

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**CORROSIÓN DE CUERDAS DE INSTRUMENTOS MUSICALES.  
INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO.**

**TESIS DOCTORAL**

Autor: José Luis López Muelas

Directores de la Tesis: Dr. José Antonio Bonastre (U.P.V.)  
Dr. José María Gadea (U.P.V.)

Julio 2017



# Agradecimientos

...Y alguien inquirió:

- ¿Y tú José Luis, por qué te has metido en este berenjenal?

-Vaya, buena pregunta. Pues si quieres que te diga la verdad, por falta de autoestima. Esa fue mi respuesta.

Creo que la primera semilla que dio fruto en este viaje resultó ser tan pequeña, tan insignificante como el concepto que en aquel momento tenía de mí mismo. Tan diminuta como la semilla de la mostaza. Pero ha resultado ser de su misma naturaleza pues de su modesto tamaño ha crecido un precioso árbol.

"...A la mar me voy, mis hechos dirán quién soy". Se acerca el momento de atracar en Ítaca, la que me ha brindado tan hermoso viaje y al hacer este pequeño ejercicio de introspección el ser emocional que me domina, este que suscribe, confirma que el final sólo cobra sentido desde la perspectiva del viaje y sé que ha valido la pena. Mis cicatrices lo confirman, mis miedos, mis flaquezas, perezas y miserias sobrellevadas, pero sobre todo lo vocea el niño alegre que hay dentro de mí; el que sigue asombrándose y celebrando cada pequeño paso, el que formula preguntas y busca respuestas.

El camino recorrido es lo único que nos llevamos o más aún, somos camino. Nuestra esencia es el sendero; ser pasos y experiencia de esos pasos. Ser devenir, ser cambio, transformación. Hay que crecer y transformarse. El movimiento lo es todo.

**Gracias, infinitas gracias a todos los que habéis compartido conmigo este viaje. Que el velamen de vuestra nave se vea favorecido por el Dios de los vientos y que el Amor llene vuestros corazones generosos.**



# Dedicatoria

A ti mujer...  
...por todos los caminos.

Gabriel, Esther, Pau, Mamá, Papá...hay un Dios que nos ama y  
vosotros sois la prueba irrefutable.

Javi, te quiero hermanito...siempre estás ahí...

Antonio...mi alférez, querido y admirado,  
tía Lea...cuanta ternura, nos veremos en el cielo.

A mi otra mamá, Mari Ángeles y mis  
otros seis hermanitos... sois mi familia.

A mi rebaño...soy tan feliz a  
vuestro lado...

Amigos sois mis maestros...  
Maestros, amigos os  
considero.

Y a la música.



*Aunque tuviera el don de la predicción y conociera todos los misterios y toda la ciencia, aunque tuviera toda la fe, una fe capaz de trasladar montañas, si no tengo amor, no soy nada.*

**1Co, 2-4.**



# Resumen



## Resumen

En este trabajo se ha evaluado el estado de corrosión de cuerdas de acero de guitarra producido por una disolución sintética de sudor humano. Se ha reproducido para tres supuestos. Primero, sin ningún sistema de protección contra la corrosión. Segundo, incorporando la protección catódica de las cuerdas mediante ánodos de sacrificio. Y tercero, sometiendo las cuerdas a un sistema de protección catódica por corriente impresa.

Una estructura puede protegerse contra la corrosión uniéndola a otro metal de menor energía de ionización, que actuará de ánodo frente a ella, corroyéndose al tiempo que la protege. Esta es la idea básica de la protección catódica por ánodos de sacrificio, en la que se consigue la corriente necesaria para la protección sin necesidad de una fuente externa. Si por el contrario la protección puede conferirse por medio de una fuente externa de corriente continua a bajos voltajes, se dice entonces que se efectúa la protección por corriente impresa.

En cada uno de estos supuestos, y para cada estadio de corrosión, se han caracterizado las cuerdas electroquímicamente y acústicamente. De este modo se ha desarrollado una metodología que podrá identificar la influencia de diversos grados de corrosión y protección en las propiedades acústicas de estas cuerdas.

Los parámetros empleados para definir el estado de corrosión de las cuerdas han sido: la resistencia de polarización ( $R_p$ ) que determina la velocidad de corrosión instantánea, y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) que proporciona la información para evaluar el estado de corrosión de las cuerdas en el seno de la disolución de sudor. Para determinar las pérdidas de masa por corrosión se han efectuado medidas gravimétricas. Así mismo, mediante FESEM y microscopía estereoscópica se han evaluado los cambios morfológicos, también se han determinado los cambios en la composición superficial mediante EDX.

Para registrar el sonido de las cuerdas de acero en cada situación, se ha procedido a construir un instrumento en el cual se disponen las cuerdas de modo que se impida en lo posible la aparición de frecuencias espurias debidas al propio instrumento, es decir, que permita registrar solamente el sonido de la cuerda. Dicho instrumento permite su afinación y también la medida de la tensión de las cuerdas. Dichos sonidos se registraron en una cámara

anecoica, utilizándose para ello un micrófono omnidireccional Brüel & Kjaer tipo 4957.

Para caracterizar y objetivar el sonido de las cuerdas de acero se han obtenido para cada registro la transformada rápida de Fourier (FFT), los espectrogramas frecuencia–tiempo y los parámetros psicoacústicos: sonoridad, agudeza, rugosidad, tonalidad, fluctuación y sensación de agrado. Los parámetros psicoacústicos intentan medir objetivamente la percepción humana del sonido.

Con la finalidad de controlar el proceso de corrosión y de este modo mantener las cuerdas en el mejor estado posible de conservación, como ya se ha mencionado, se ha empleado la protección catódica por ánodo de sacrificio, así como la protección catódica mediante corriente impresa.

El último método citado se ha mostrado con claridad como el más eficiente, pues ha reducido en un 40 % la corrosión de las cuerdas de acero, y como consecuencia directa, se han mantenido elevados valores para la amplitud de la señal acústica en los primeros modos de vibración.

Finalmente, el análisis psicoacústico confirma que las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa proporcionan la mejor percepción subjetiva de las cualidades acústicas de las cuerdas.

# Resum



## Resum

En este treball s'ha avaluat l'estat de corrosió de cordes d'acer de guitarra produït per una dissolució sintètica de suor humana. S'ha reproduït per a tres supòsits. Primer, sense cap sistema de protecció contra la corrosió. Segon, incorporant la protecció catòdica de les cordes per mitjà d'ànode de sacrifici. I tercer, sotmetent les cordes a un sistema de protecció catòdica per corrent impresa.

Una estructura pot protegir-se contra la corrosió unint-la a un altre metall amb menor energia de ionització, que actuarà d'ànode enfront d'ella, corrint-se alhora que la protegix. Esta es la idea bàsica de la protecció catòdica per ànodes de sacrifici, en la que s'aconsegueix el corrent necessari per a la protecció sense necessitat d'una font externa. Si pel contrari la protecció pot conferir-se a través d'una font externa de corrent continu a baixos voltatges, es diu llavors que s'efectua la protecció per corrent impresa.

En cada un d'estos supòsits, i per a cada estadi de corrosió, s'han caracteritzat les cordes electroquímicament i acústicament. D'esta manera s'ha desenrotllat una metodologia que podrà identificar la influència de diversos graus de corrosió i protecció en les propietats acústiques d'estes cordes.

Els paràmetres empleats per a definir l'estat de corrosió de les cordes han sigut: la resistència de polarització ( $R_p$ ) que determina la velocitat de corrosió instantània, i l'espectroscòpia d'impedància electroquímica (EIS) que proporciona la informació per a avaluar l'estat de corrosió de les cordes en el si de la dissolució de suor. Per a determinar les pèrdues de massa per corrosió s'han efectuat mesures gravimètriques. Així mateix, per mitjà de FESEM i microscòpia estereoscòpica s'han avaluat els canvis morfològics, també s'han determinant els canvis en la composició superficial per mitjà d'EDX.

Per a registrar el so de les cordes d'acer en cada situació, s'ha procedit a construir un instrument en el qual es disposen les cordes de manera que s'impedisca en la mesura que es pugui aparició de freqüències espúries degudes al propi instrument, és a dir, que permeta registrar només el so de la corda. El dit instrument permet la seua afinació i també la mesura de la tensió de les cordes. Els dits sons es van registrar en una cambra anecoica, utilitzant-se per a això un micròfon omnidireccional Brüel & Kjaer tipus 4957.

Per a caracteritzar i objectivar el so de les cordes d'acer s'han obtingut per a cada registre: la transformada ràpida de Fourier (FFT), els espectrogrames freqüència-temps i els paràmetres psicoacústics: sonoritat, agudesa, rugositat, tonalitat, fluctuació i sensació de grat. Els paràmetres psicoacústics intenten mesurar objectivament la percepció humana del so

Amb la finalitat de controlar el procés de corrosió i d'esta manera mantindre les cordes en el millor estat possible de conservació, com ja s'ha mencionat, s'ha empleat la protecció catòdica per ànode de sacrifici, així com la protecció catòdica per mitjà de corrent impresa. L'últim mètode citat s'ha mostrat amb claredat com el més eficient, perquè ha reduït en un 40 % la corrosió de les cordes d'acer, i com a conseqüència directa, s'han mantingut elevats valors per a l'amplitud del senyal acústic per als primers modes de vibració.

Finalment, l'anàlisi psicoacústic confirma que les cordes protegides catòdicament per corrent impresa proporcionen la millor percepció subjectiva de les qualitats acústiques de les cordes.

# Abstract



## **Abstract**

In this work we have evaluated the corrosion state of steel guitar strings produced by a synthetic solution of human sweat. It has been reproduced for three assumptions. First, without any system of protection against corrosion. Second, incorporating the cathodic protection of the strings by means of sacrificial anodes. And third, by subjecting the strings to a cathodic protection system by impressed current.

A structure can be protected against corrosion by attaching it to a lower ionization energy metal, which will act as an anode in front of it, corroding itself while protecting it. This is the basic idea of cathodic protection by sacrificial anodes, in which the necessary current for the protection is obtained without the necessity of an external source. If, on the contrary, the protection can be conferred by means of an external source of direct current at low voltages, it is then said that the protection is effected by impressed current.

In each of these assumptions, and for each stage of corrosion, the strings have been characterized electrochemically and acoustically. In this way, a methodology has been developed that will be able to identify the influence of different degrees of corrosion and protection on the acoustic properties of these strings.

The parameters used to define the corrosion state of the strings have been: the polarization resistance ( $R_p$ ) that determines the instantaneous corrosion rate, and the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) that provides the information to evaluate the corrosion state of the strings inside the artificial human sweat solution. Gravimetric measurements have been carried out to determine the mass losses due to corrosion. Also, through FESEM and stereoscopic microscopy, morphological changes have been evaluated, changes in surface composition have also been determined by EDX.

In order to record the sound of the steel strings in each situation, an instrument has been constructed in which the strings are arranged so as to prevent, as far as possible, the occurrence of spurious frequencies due to the instrument itself, recording only the sound of strings. This instrument allows its tuning and also the measurement of the tension of strings. These sounds were recorded in an anechoic chamber, using an omnidirectional Brüel & Kjaer type 4957 microphone.

To characterize and objectify the sound of the steel strings, the Fourier transform (FFT), the frequency-time spectrograms and the psychoacoustic parameters: sonority, sharpness, roughness, pitch, fluctuation and pleasing sensation were obtained for each record. Psychoacoustic parameters attempt to objectively measure the human perception of sound.

To control the corrosion process and thus to keep the strings in the best possible state of preservation, as has already been mentioned, cathodic protection by sacrificial anode has been used, as well as cathodic protection by means of impressed current.

The latter method has been clearly shown to be the most efficient, since it has reduced steel strings corrosion by 40%, and as a direct consequence, high values have been maintained for the amplitude of the acoustic signal for the first modes of vibration.

Finally, the psycho-acoustic analysis confirms that strings protected by the impressed current provide the best subjective perception of the acoustic qualities of the strings.

# Índice general



# Índice general

Agradecimientos

Dedicatoria

Aforismo

Resumen

Resum

Abstract

Índice general

Capítulo 1. Motivación	27
1.1. Introducción	29
1.2. Antecedentes	35
1.3. Hipótesis de trabajo	41
1.4. Objetivos	45
Capítulo 2. Conceptos teóricos	49
2.1. Conceptos teóricos electroquímicos	51
2.1.1. Corrosión electroquímica	53
2.1.2. Pilas de aireación diferencial	55
2.1.3. Corrosión galvánica	55
2.1.4. Corrosión por esfuerzo	56
2.1.5. Métodos electroquímicos cuantitativos de la medida de la velocidad de corrosión	57
2.1.5.1. Método de la intersección	57
2.1.5.2. Método de la resistencia de polarización ( $R_p$ )	59

2.1.6. Espectroscopia de impedancia electroquímica	60
2.1.6.1. Dispositivo experimental	61
2.1.6.2. Células y electrodos: descripción	61
2.1.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	62
2.1.8. Energía dispersiva de rayos x (EDX)	62
2.2. Conceptos teóricos vibratorios y acústicos	65
2.2.1. ¿Qué es el sonido?	67
2.2.2. Infrasonido, sonido ultrasonido	68
2.2.3. Umbral de audición	68
2.2.4. Cómo se mide el sonido	70
2.2.5. Velocidad y presión relativas a la propagación del sonido	71
2.2.6. Timbre agudeza auditiva y enmascaramiento	72
2.2.7. El espectro de frecuencias	72
2.2.8. Espectrograma y análisis de frecuencia	74
2.2.9. La transformada de Fourier	75
2.2.10. Hipótesis de partida	76
2.3. Conceptos teóricos psicoacústicos	79
2.3.1. Introducción	81
2.3.2. Parámetros de medida del sonido	81
2.3.2.1. Sonoridad	82
2.3.2.2. Agudeza	84
2.3.2.3. Aspereza o rugosidad	84
2.3.2.4. Tonalidad	85
2.3.2.5. Sensación de agrado	86
2.3.2.6. Fuerza de Fluctuación	86
2.3.3. Armónico obtenido a partir de las condiciones iniciales	87

Capítulo 3. Procedimiento experimental	91
3.1. Justificación general de la metodología de trabajo	93
3.2. Procedimiento experimental electroquímico	99
3.2.1. Procedimiento experimental aplicado a la caracterización vibro-acústica de las cuerdas en función de su estado de corrosión	101
3.2.2. Procedimientos experimentales aplicados al control de la corrosión mediante protección catódica por ánodo de sacrificio y por corriente impresa	109
3.3. Procedimiento experimental acústico	119
Capítulo 4. Resultados y discusión	125
4.1. Resultados y discusión de la caracterización vibro-acústica de las cuerdas en función de su estado de corrosión	127
4.2. Resultados y discusión del control de la corrosión mediante protección catódica por ánodo de sacrificio y por corriente impresa	153
Capítulo 5. Conclusiones generales	193

Capítulo 6. Líneas futuras	199
Referencias	203
Anexo 1. Fundamentos de las cámaras anecoicas	211
Anexo 2. Aspectos relevantes de la electrónica aplicados a los instrumentos musicales de cuerda	217
Contribuciones a congresos	225
Publicaciones o documentos científicos	229

# Capítulo 1. Motivación

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **1.1. Introducción**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 1.1. Introducción

Partiendo de la premisa razonable de que existe un condicionante subjetivo en la percepción del sonido para cada individuo, como músico experimento regularmente las cualidades acústicas de cada uno de mis instrumentos de cuerda pulsada.

Así mismo, existe un conjunto de variables en el diseño de un instrumento musical, cuya elección determina de forma cuantificable la huella sonora de ese instrumento.

Tomemos como punto de partida la selección de las maderas apropiadas para cada una de las partes de un instrumento de cuerda.

Será, por ejemplo, una buena opción, la selección de la [1] samanguilla de África (Kaya Ivorensis) para la construcción del mástil, su fortaleza y flexibilidad serán perfectas para soportar las sollicitaciones mecánicas de las seis cuerdas de acero que permanecen tensadas a sus extremos.

La gran dureza, durabilidad y escasa porosidad del ébano de Guinea (Diospyros Krassiflora) será muy adecuada para el diapason. Una lámina cruda del mismo, fijada sobre el mástil, soportará el continuo desgaste por fricción en el uso habitual.

La selección de la madera apropiada para el cuerpo estará determinada por la consecución de un excelente sustain (nivel de sostenimiento). El fresno o la caoba de Honduras son óptimos por su dureza y gran densidad, pero demasiado pesados. Hasta unos 4,5 kg pesa una guitarra de caoba, aunque afortunadamente, a medida que la electrónica ha ido avanzando, se han podido ir seleccionando maderas más livianas, pues los circuitos activos electrónicos, integrados en las guitarras, han compensado en cierta medida las carencias acústicas de estas maderas. Así se ha podido optar por un compromiso satisfactorio entre la ergonomía y las cualidades acústicas.

Así mismo, es un conocimiento extendido, que entre los diversos aspectos que intervienen directamente en la definición de las cualidades del sonido, la naturaleza de las cuerdas es fundamental. En el mercado internacional la

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

opción de un juego de cuerdas de acero con baño de níquel es la que tiene más adeptos, sin duda será acertada pues no dañará los trastes tanto como las cuerdas de acero puro y la sensación al tacto con nuestros dedos será agradable.

Por otra parte, su sonido tendrá un brillo equilibrado, agradable y melódico y además producirá menos ruido sobre el diapasón al frotar los dedos.

Y continuando con las cuerdas, no es extraño que los músicos mantengamos en uso cuerdas cuyo estado de corrosión se encuentre en sus primeras fases. La razón no tiene porqué ser necesariamente la dejadez o el ahorro de unos euros. A menudo es la búsqueda del timbre deseado. El efecto de una leve corrosión en las cuerdas transforma su sonido, destacando las frecuencias medias y bajas. Pero en unos meses la herrumbre acaba por volverlas inservibles, de tacto desagradable e incluso cortante, hasta producirse finalmente su rotura.

En la última década, un conocido fabricante ha desarrollado un producto basado en la incorporación de una microcubierta de teflón sobre las cuerdas.

La eficacia de esta solución es discutible, pues el teflón reduce notablemente el nivel de sostenimiento acústico de las cuerdas.

Por otra parte, las cuerdas se vuelven resbaladizas por efecto de la sudoración natural de los dedos sobre la micro capa de teflón y como consecuencia, la digitación rápida sobre el diapasón se torna poco precisa.

Por último, con el tiempo de uso, las cuerdas terminan oxidándose, pues la cubierta sintética acaba por desaparecer como consecuencia del desgaste provocado por la fricción de los dedos.

Como respuesta a esta cuestión, en el segundo bloque del trabajo experimental de esta tesis, se han empleado métodos electroquímicos basados en la protección catódica para limitar el avance del ataque corrosivo. En lo relativo a los efectos de la corrosión metálica sobre las cualidades acústicas de las cuerdas, hasta la fecha sólo se tenían impresiones cualitativas.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Así pues, la necesidad de acudir a la ciencia con estas inquietudes, ha dado vida a este proyecto de investigación.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **1.2. Antecedentes**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 1.2. Antecedentes

En la bibliografía existen escasas referencias de trabajos relacionados con estudios de corrosión de cuerdas de guitarra metálicas en medios que simulen los fluidos humanos. Así, se tiene constancia de un grupo de la Universidad de Zagreb. Su interés se centra en el proceso de corrosión de las cuerdas provocado por la transpiración de la piel, y como consecuencia, la generación de un importante número de sales disueltas [2-4], siendo las de níquel habitual causa de dermatitis [4], que puede derivar en alergia, generalmente incurable (el níquel no es causa de dermatitis, por sí mismo, pero sus sales son las más alergénicas) [5-9]. El 86.5% de músicos que tocan instrumentos de cuerda tienen problemas con la piel.

En los trabajos de este grupo de investigación se ensayaron 6 cuerdas D´Addario: [3] las tres de mayor sección transversal se denominan tipo W (wrap): E6, A5 y D4, y están formadas por dos cables.

El primer cable es de acero especial para núcleos de cuerdas de instrumentos musicales, cuya sección transversal es hexagonal y que está cubierto por un baño de estaño y un segundo cable de acero al carbono con baño de níquel, de sección circular y que permanece arrollado al primero [2,4]. Las tres cuerdas restantes son de menor sección transversal y se denominan tipo S (single): g3, b2, e1. Están formadas por un solo cable de acero de sección circular [2,4].

El equipo de investigadores llevó a cabo una primera etapa experimental con las cuerdas E6 y D4, que fueron publicadas en 2009. Los resultados de la segunda etapa experimental se publicaron en 2010, en esta fase se abarcó el total de las seis cuerdas.

Las cuerdas fueron caracterizadas [3] mediante microscopía óptica y mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), y sus composiciones químicas se determinaron mediante la espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente [2] (ICP-OES) y, adicionalmente, mediante espectrometría de absorción atómica (AAS).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Las composiciones químicas de la capa que cubría las cuerdas se determinaron mediante un equipo de (FESEM) equipado con detector de energía dispersiva de rayos X (EDX), el espesor de la capa de níquel se determinó antes y después de la corrosión en una solución de 10 ml de sudor artificial (EN 1811.1999).

Este proceso se realizó cuatro veces, al final de cada semana (a los 7, 14 y 28 días). Se determinaron las cantidades de iones metálicos:  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Sn^{2+}$  y  $Fe^{3+}$  desprendidos en la solución corrosiva mediante ICP-OES, los resultados se expresaron como cantidad de cationes metálicos en mg por  $cm^2$  de cuerda de guitarra eléctrica analizada. El procedimiento descrito fue también el empleado por el grupo de investigadores, para la estimación de la corrosión de las cuerdas mediante una red neuronal artificial en 2009.

Los resultados mostraron los siguientes cationes disueltos tras el proceso de corrosión:  $Ni^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Si^{4+}$ . Por una parte, los cationes:  $Mn^{2+}$ ,  $Si^{4+}$  y  $Fe^{3+}$ , procedían de la masa del alma de acero, mientras que los de  $Sn^{2+}$  se habían desprendido de su cubierta de estaño [2-4].

De las cuerdas W se desprendió la mayor parte de  $Ni^{2+}$ , procedente de la fina cubierta de níquel del arrollamiento, no obstante, una pequeña cantidad se desprendió de la masa del núcleo de acero de las cuerdas S. La incidencia de los cationes de  $Fe^{3+}$  disueltos, resultó 50 veces más elevada que la de cualquier otro ion metálico desprendido. La presencia de níquel resultó ser de menor cantidad (en un periodo de cuatro semanas sólo  $0.172\mu g/cm^2$ ), [10] por debajo del límite de seguridad establecido para evitar afecciones cutáneas ( $0.5\mu g/cm^2/semana$ ).

Si bien, en estos trabajos se hizo referencia a la posible influencia de la corrosión en las cualidades acústicas de las cuerdas de guitarra, no se tiene constancia de que se haya realizado medida alguna para establecer cuantitativamente esta relación.

Tampoco en lo que atañe a la vibro-acústica de cuerdas de guitarra existen demasiadas referencias en la bibliografía científica. Los artículos encontrados solo se refieren a la cualificación o cuantificación de la calidad acústica de cuerdas, sin establecer relaciones con el estado de corrosión de las mismas.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Dayan y Behar en 1979 [11] ya estudiaron la calidad acústica de las seis cuerdas de una guitarra acústica. Para ello construyeron un útil para excitar las cuerdas y poder grabar los registros de sonido aislando las frecuencias espurias que la caja de una guitarra pudiese proyectar. De los registros sonoros se realizó un estudio de los niveles de armónicos, de la inarmonía y del ratio y distribución de la atenuación. Además, se realizó un análisis subjetivo mediante un test psicoacústico en el que participaron treinta guitarristas profesionales que definieron su impresión sobre la calidad acústica de las cuerdas.

Posteriormente en 1983, Hanson [12] discutió, en una comunicación, algunos aspectos del artículo de Dayan y Behar [11]. Entre otras cuestiones hizo referencia a la importancia que la posición del ataque de la cuerda tenía, en el realce o no de ciertos armónicos.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **1.3. Hipótesis de trabajo**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 1.3. Hipótesis de trabajo

1. La hipótesis fundamental, parte del supuesto de que la composición química de las cuerdas de los instrumentos musicales podría influir en las cualidades del sonido producido por su vibración.
2. Como consecuencia, el proceso de corrosión provocado por el sudor humano en cuerdas de acero podría afectar en gran medida a la caracterización acústica del sonido, así como al progresivo deterioro de las muestras metálicas y en el peor de los casos a la generación de reacciones alérgicas en la piel.
3. La integración de un sistema de protección catódica en la estructura de los instrumentos musicales de cuerda, podría constituir un medio eficaz para preservar las propiedades del sonido, para prolongar la vida útil de las cuerdas y evitar la incidencia de afecciones cutáneas producidas por el óxido de níquel.

Se han elegido muestras comerciales de cuerdas D4 NW026 D´Addario para guitarra eléctrica, pues éstas han sido utilizadas en los experimentales que el estado del arte ha proporcionado y como consecuencia, se han tomado como base del presente trabajo.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **1.4. Objetivos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 1.4. Objetivos

A continuación se expone de forma concisa el conjunto de objetivos propuestos:

1. Simular las condiciones reales en las que se produce la corrosión de las cuerdas de instrumentos musicales.
2. Evaluar el estado de corrosión de los componentes metálicos de las cuerdas en función del tiempo de exposición a los agentes corrosivos, con y sin protección catódica.
3. Aplicar procedimientos de protección de la corrosión sobre las cuerdas.
4. Comparar los cambios en la composición superficial y la morfología de las cuerdas sometidas al proceso de corrosión, sin protección y con protección catódica.
5. Evaluar los parámetros vibro-acústicos de las muestras y los cambios que se producen en éstos como consecuencia de la corrosión, con y sin protección catódica.
6. Establecer relaciones entre las medidas de corrosión y las medidas acústicas o vibratorias, que permitan obtener modelos analíticos y numéricos.

Las correspondientes soluciones experimentales y la metodología necesaria para su consecución se describirán detalladamente a lo largo del texto.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Capítulo 2. Conceptos teóricos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **2.1. Conceptos teóricos electroquímicos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.1. Conceptos teóricos electroquímicos

A continuación, se va a describir el mecanismo de corrosión electroquímica, que ha intervenido fundamentalmente en los procesos de corrosión controlada llevados a cabo a lo largo de las distintas etapas experimentales de la presente tesis. Así mismo, persiguiendo una finalidad didáctica, serán descritos los fundamentos de algunos procesos de corrosión por su importancia en la interpretación electroquímica de los resultados experimentales obtenidos.

#### 2.1.1. Corrosión electroquímica.

La corrosión electroquímica se da cuando los materiales metálicos se hallan en contacto con medios de conductividad electrolítica, en particular con el agua, soluciones salinas o la simple humedad de la atmósfera y de los suelos. De acuerdo con esto, la presencia de moléculas de agua sobre la superficie es la condición necesaria para que la corrosión transcurra por el mecanismo electroquímico.

La unión eléctrica entre dos metales distintos, [13-16] por ejemplo el cinc y el cobre, sumergidos en una solución conductora, genera una corriente eléctrica debido a la diferencia entre los potenciales electroquímicos de ambos metales. El paso de carga a través del líquido (electrolito) consiste en el movimiento de aniones y cationes que la transportan hacia el ánodo y el cátodo, respectivamente. La superficie del metal con mayor tendencia a la disolución (zona anódica) es corroída en un proceso en que los átomos metálicos dejan sus electrones en el seno del metal pasando a la solución como ion positivo. Por otro lado, la superficie del metal con una menor tendencia termodinámica a la disolución (zona catódica) permanece inmune al ataque. Ella recibe, a través de la masa metálica, los electrones liberados en el ánodo, que son suministrados a un captador (el oxidante más fuerte presente en el electrolito), en los procesos de reducción catódica.

Puede actuar como captador de electrones cualquier oxidante, pero en la mayoría de los casos actúa como tal el oxígeno  $O_2$  disuelto en el electrolito en medios neutros y alcalinos, o ion hidronio  $H^+$  en medio ácidos. La circulación de corriente tiene lugar porque los metales están dotados de electrones de valencia móviles, y con un relativamente elevado grado de

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

libertad, lo que favorece su transferencia a otras sustancias que llegan a la superficie metálica, con capacidad para fijarlos. El gradiente de energía necesario para separar un electrón, en la ionización de un átomo metálico, determina la mayor o menor afinidad del metal por el electrón y cambia de un metal a otro. Serán activos los metales de baja energía de ionización y nobles los que posean alta. Cambia también esta energía al pasar de una a otra de las regiones, macro o microscópicamente diferenciadas, que integran cualquier superficie metálica, por lo que no es necesaria la presencia de dos metales distintos para que funcionen las pilas de corrosión. En el contacto entre metales o regiones metálicas de actividad diversa, las áreas más activas tienden a ser los ánodos de las pilas de corrosión. Sobre ellas se localiza, por tanto, el ataque electroquímico, que necesariamente ha de estar acompañado por un proceso de reducción en el cátodo. Las características básicas de un proceso de corrosión electroquímica son las siguientes:

- Se da en presencia de electrolito
- Se suele dar a temperaturas moderadas (inferiores a 100-150 °C aproximadamente).
- Morfológicamente, el ataque se localiza sobre las regiones de comportamiento anódico.
- La circulación de electrones tiene lugar desde el ánodo hasta el cátodo a través del propio metal.
- El circuito se cierra a través del electrolito mediante el transporte de carga por parte de los iones.
- Los productos primarios de corrosión más habituales (cuando la reacción catódica es la electronización del oxígeno) son hidróxidos que se forman por reacción entre los productos anódico y catódico en el seno del electrolito aunque pueden, posteriormente, fijarse sobre la superficie metálica introduciendo un cierto efecto de barrera sólida entre el metal y el medio agresivo, dificultando ligeramente la posterior reacción heterogénea metal-líquido (corrosión) en la interfase. Éstos hidróxidos suelen posteriormente pasar a óxidos en presencia de más oxígeno.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **2.1.2. Pilas de aireación diferencial.**

Desde una perspectiva morfológica del ataque corrosivo, la corrosión en resquicio [13-16], se hace presente en intersticios, en zonas de solape, uniones, en general en aquellas regiones mal aireadas o en las cuales la renovación del medio corrosivo está condicionada por mecanismos de difusión y es, en general, difícil. Muy a menudo el ataque en resquicio se debe a la formación de pilas de aireación diferencial originadas como consecuencia de la presencia de distintas presiones parciales de oxígeno en diferentes zonas de la superficie metálica y cuyo fundamento es el siguiente:

En medios aireados a pH neutro o alcalino, y por supuesto, siempre que no aparezca un oxidante más fuerte en contacto con el metal, la reacción catódica de corrosión consiste en la reducción del oxígeno disuelto en el electrólito, de acuerdo con esto, el potencial es función de la presión parcial del oxígeno y del pH, de tal manera que zonas con diferente presión parcial de oxígeno conducen a diferencias de potencial en distintas zonas de la superficie metálica, originando el funcionamiento de pilas de corrosión. La región en contacto con un bajo contenido en oxígeno tendrá menor potencial, actuará de ánodo, y sobre ella se produce la reacción anódica de corrosión. La zona más aireada presentará comportamiento catódico y, sobre ella, tendrá lugar la reacción de reducción, en este caso del oxígeno. El ataque se localiza en las regiones mal aireadas, en el interior de poros, pequeñas grietas o valles provenientes del mecanizado de un metal, pues en estas regiones el oxígeno es más escaso. La formación de productos sólidos de corrosión dificultará con el tiempo aún más el acceso de oxígeno, y contribuirá a favorecer el fenómeno.

### **2.1.3. Corrosión galvánica.**

La llamada corrosión galvánica [13-16] o corrosión bimetálica tiene lugar cuando dos metales disimilares aparecen en contacto eléctrico entre sí y en presencia de un medio agresivo en el que pueda tener lugar el mecanismo electroquímico de la corrosión. La pila galvánica se extiende, a partir de la interfase de contacto entre ambos metales o fases del metal, tanto más cuanto mayor es la diferencia de potencial entre ambos metales y cuanto mayor es la conductividad del electrólito. En definitiva, para que la macropila galvánica funcione, es necesario que se cierre el circuito electroquímico entre

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

sus extremos, de manera que, si la diferencia de potencial entre los metales que conforman el par es pequeña, o el electrólito es muy resistivo, la pila sólo puede extenderse hasta distancias cortas a partir de la zona de unión. El resto de metal expuesto fuera de la zona de influencia de la pila bimetálica, tanto en lo que se refiere al de comportamiento anódico como al de comportamiento catódico, desarrollarán el mecanismo de corrosión de manera independiente, al no estar afectadas por el par galvánico, por actuación de micropilas. De acuerdo con esto, para un par bimetálico determinado en contacto con medios conductores, como el agua de mar, la región de ataque más severo, por efecto de corrosión galvanica, se localiza sobre una zona amplia del metal anódico a partir de la interfase de contacto, mientras que en medios más resistivos, como el agua dulce o la atmósfera, el ataque se localizan preferentemente en una zona restringida del metal activo, situada en la proximidad de la interfase. De la misma manera, quedará protegida una superficie tanto mayor de metal de comportamiento catódico, cuanto más conductor sea electrolito.

### **2.1.4. Corrosión por esfuerzo.**

La rotura por corrosión por esfuerzo [13,14,18] (stress-corrosion cracking SCC) de metales se refiere a la rotura causada por el efecto combinado de esfuerzos de tensión y un entorno corrosivo específico actuando sobre el metal. Durante la SCC el ataque que recibe la superficie del metal es generalmente muy pequeño mientras que las grietas aparecen perfectamente localizadas y se propagan a lo largo de la sección del metal.

Los mecanismos involucrados en la SCC no están completamente aclarados puesto que existen muy diferentes sistemas aleación-ambiente que involucran mecanismos muy diferentes. La mayor parte de los mecanismos SCC involucran etapas de iniciación y propagación de la rotura. En muchos casos la rotura se inicia con una grieta u otra forma de discontinuidad en la superficie del metal. Una vez que la rotura ha comenzado, su frente puede avanzar. Se acumula una alta tensión en el extremo de la grieta como consecuencia del esfuerzo de tensión que actúa sobre el metal. Tiene lugar la disolución anódica del metal por corrosión electroquímica localizada que sitúa en el extremo de la grieta mientras esta avanza.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Los métodos para su prevención son generales y empíricos. Algunos de los siguientes métodos prevendrá o reducirá la SCC en metales:

1. Disminuir el esfuerzo de tensión sobre la aleación por debajo del que origina la rotura.
2. Eliminar el ambiente perjudicial.
3. Cambiar la aleación si no es posible modificar el esfuerzo o el ambiente.
4. Aplicar protección catódica utilizando ánodos de sacrificio o aplicando una corriente impresa externa.

Con un fin orientativo, a continuación se van a describir los aspectos más significativos de las técnicas experimentales que han sido fundamentales en el desarrollo experimental de este proyecto de investigación. Este punto constituye un paso previo y necesario para la justificación general de la metodología de trabajo que se desarrollará en el punto 3.1.

Las técnicas utilizadas han sido las siguientes: Resistencia de polarización ( $R_p$ ), Test de Tafel (método de intersección), Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) .

### **2.1.5. Métodos electroquímicos cuantitativos de medida de la velocidad de corrosión.**

#### **2.1.5.1. Método de intersección.**

Como consecuencia de la reacción anódica de corrosión se produce intercambio electrónico en el sentido de la oxidación, lo que da lugar a un determinado valor de intensidad anódica  $I_a$  [13,18] de la misma manera, se produce una corriente catódica  $I_c$  igual y de signo contrario por intercambio electrónico en el sentido de la reducción en las regiones de comportamiento catódico.

En condiciones reales, cuando el metal se sitúa en el potencial de corrosión no existe corriente neta detectable, puesto que los módulos de  $I_a$  e  $I_c$  coinciden pero ambas tienen distinto signo. Y, por lo tanto:  $I = I_a + I_c = 0$

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

Para poder registrar la corriente que circula por la pila, es preciso sacar al sistema del equilibrio, es decir, polarizar con un equipo instrumental adecuado al sistema, desplazándolo del potencial de corrosión algunos milivoltios en oxidación o en reducción, para obtener una corriente neta anódica o catódica, ya que en estas condiciones  $I_{\text{corr}} = I_a = |I_c|$ .

Para el trazado, en el laboratorio, de las curvas de polarización [13, 18], se trabaja de la siguiente manera: para la curva anódica se impone al metal en contacto con el medio en el que se pretenden conocer las curvas de polarización, potenciales cada vez mayores a partir del potencial de corrosión, y se registran las correspondientes respuestas del sistema en intensidad. De igual manera, para el trazado de la curva catódica, se impone potenciales inferiores al de corrosión y se registran datos de intensidad catódica neta, que tendrán signo contrario a los correspondientes a la curva anódica. Siguiendo el procedimiento propuesto por Evans, para visualizar mejor gráficamente los valores de  $E_{\text{corr}}$  y  $I_{\text{corr}}$  se puede abatir la curva catódica sobre el eje positivo de intensidades. Por último, se puede establecer la representación anterior en función de  $E$  y  $\log i$ , con lo cual se obtendrán tramos rectos cuando el proceso de oxidación o reducción esté controlado por fenómenos de polarización de activación (rectas de Tafel), como se muestra en la figura.

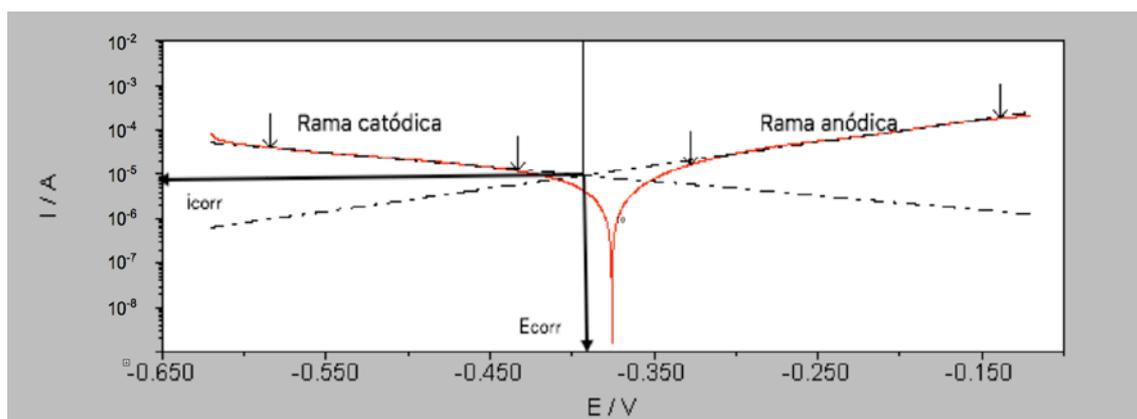


Fig.1. Detalle de la determinación de  $I_{\text{corr}}$  a partir del punto de corte de las tangentes a las curvas de polarización en la zona de activación.

Las curvas obtenidas son experimentales y aparentes, pues no se ajustan exactamente al proceso de corrosión, teniendo en cuenta que se ha sacado

al sistema del equilibrio. El diagrama mostrado permite además obtener gráficamente el valor de la densidad de corriente de corrosión y, por tanto, de la velocidad de corrosión. Es posible determinar  $i_{corr}$  sin más que observar el punto de corte de las tangentes a las curvas de polarización en la zona de activación.

### 2.1.5.2. Método de la resistencia de polarización ( $R_p$ ).

La medida de la resistencia de polarización [13, 16, 18] ha sido la técnica que más ha contribuido al avance de la ciencia de la corrosión. El procedimiento se basa en determinar experimentalmente el cociente entre la polarización impuesta y la respuesta en intensidad obtenida  $\Delta V/\Delta I$  (resistencia de polarización) y las pendientes de las curvas de polarización en la región de activación. Para ello se impone al sistema una polarización que debe ser de pequeña magnitud para sacar lo menos posible al sistema del equilibrio, habitualmente unos 10 mV, respecto al  $E_{corr}$  con el fin de no alterarlo demasiado, sacándolo de las condiciones reales de operación, que se dan cuando trabaja en el  $E_{corr}$ . Con éste valor de polarización  $\Delta V$  se registra la intensidad neta  $\Delta I$  con la que el sistema responde. Conocidos el cociente y los valores de las pendientes de las curvas de polarización anódica y catódica en la zona de activación, que pueden considerarse constantes,  $\beta_a$  y  $\beta_b$ , puede demostrarse que el valor de la  $i_{corr}$  viene dado por:

$$i_{corr} = \frac{b_a \cdot b_c}{2.3(b_a + b_c)} \times \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (1)$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

$$\text{siendo } B = \frac{b_a \cdot b_c}{2.3(b_a + b_c)} \quad (3)$$

En la figura 2, a modo de ejemplo, se puede observar una gráfica típica obtenida en los estudios preliminares de esta tesis.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

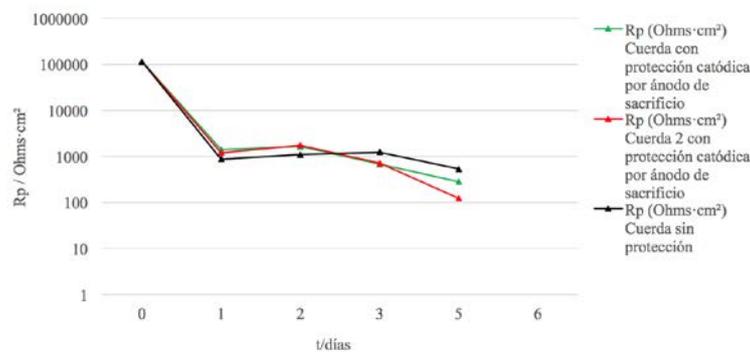


Fig 2. Representación gráfica de la resistencia de polarización  $R_p$  en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético de las cuerdas ensayadas en pruebas preliminares.

### 2.1.6. Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

La técnica consiste en la aplicación de un potencial eléctrico de frecuencia variable al material objeto de estudio para medir la respuesta en corriente dentro de una celda electroquímica. [13, 16, 18, 19] La interpretación de los resultados experimentales requiere el uso de una analogía entre el sistema electroquímico en estudio y un circuito eléctrico equivalente. Los resultados pueden ser interpretados mediante los diagramas de Nyquist y los diagramas de Bode. En los diagramas de Nyquist se representa la parte imaginaria de la impedancia frente a la parte real de la misma. En los diagramas de Bode se representa el logaritmo del módulo de la impedancia y la fase frente el logaritmo de la frecuencia. En estos diagramas es posible detectar las regiones que son dominadas por elementos resistivos tales como la resistencia del electrolito, resistencia electrónica del material, resistencia de intercambio electrón-ión e ión-ión, etc., y también los elementos capacitivos como la capacidad de un material dieléctrico y la capacidad de la doble capa electroquímica asociada a las interfases presentes. También se pueden analizar los procesos de difusión de iones mediante la resistencia característica de difusión de Warburg. Como ejemplo, en la figura 3 se observa un circuito eléctrico equivalente.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

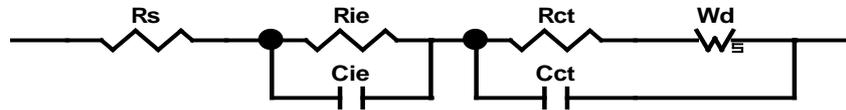


Fig 3. Ejemplo de circuito eléctrico equivalente.

## 2.1.6.1. Dispositivo experimental

Para realizar las medidas de impedancia se ha empleado potencióstato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT30, con un módulo de impedancia electroquímica y el programa informático Frequency Response Analyser (FRA) versión 4.9.

Las medidas de impedancia fueron realizadas a potencial constante una vez estabilizado el potencial del sistema a circuito abierto. La amplitud del potencial empleado fue  $\pm 10$  mV y el rango de frecuencias entre  $10^4$  y  $10^{-2}$  Hz.

Los ajustes mediante circuitos equivalentes de los datos experimentales y las simulaciones fueron realizados mediante el programa informático Zview versión 2.70.

## 2.1.6.2. Células y electrodos: descripción

El estudio de impedancia se realizó a partir de los ensayos de corrosión controlada de las cuerdas D4 NW026 D'Addario llevados a cabo en la disolución de sudor humano sintético. La configuración de la celda quedó definida por tres electrodos: electrodo de trabajo (la cuerda de guitarra), contraelectrodo de platino y electrodo de referencia Ag/AgCl (3M KCl).

Después de finalizado el período de ataque corrosivo previsto, las cuerdas se sometieron a una limpieza mecánica cuidadosa con el fin de eliminar los productos de corrosión, utilizando además como decapante una disolución 1 g/l de hexametilentetramina en ácido clorhídrico 1 M, con el fin de disolver los óxidos de Fe producidos durante el ataque. A continuación se sometieron a un baño con acetona en ultrasonidos y posteriormente se secaron y pesaron

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

de nuevo, registrándose de nuevo la masa de material de la cuerda no afectado por la corrosión. Las pérdidas de masa gravimétrica así obtenidas se contrastaron con los resultados extraídos del resto de las técnicas experimentales.

### **2.1.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La microscopía electrónica de barrido, es una técnica basada en el bombardeo de las muestras con un haz de electrones. Como resultado de esta interacción, se obtiene una imagen de la superficie de las muestras, con lo cual es posible estudiar su morfología.

Cuando un haz de electrones choca con la superficie de una muestra, se pueden dar las siguientes interacciones:

a) Dispersión elástica: afecta a las trayectorias de los electrones sin que haya un cambio detectable en la energía del haz de los electrones. La mayoría experimenta numerosas colisiones y como resultado, acaban saliendo de la superficie como electrones retrodispersados.

b) Dispersión inelástica: es cualquier proceso en el que hay una pérdida apreciable en la energía del haz de electrones. Estos procesos son los responsables de que un electrón sea frenado por el sólido. Por ello, casi toda la energía cinética de los electrones termina como calor en la muestra, y una pequeña porción puede escapar como rayos X o como electrones secundarios.

Los electrones secundarios y retrodispersados se han utilizado para la formación de las imágenes en el microscopio electrónico de barrido. Los análisis se han realizado con un Jeol JSM-840 Scanning Microscope.

### **2.1.8. Energía dispersiva de rayos x (EDX)**

Esta técnica se utiliza junto con la SEM y consiste en un microanálisis de la muestra a partir de un espectro de rayos X.

Cuando a consecuencia del bombardeo de la muestra con el haz de electrones, un electrón interno es expulsado fuera del átomo, este se queda

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

en un estado excitado. Los mecanismos que el átomo tiene para relajarse son dos:

a) Emisión característica Auger: la vacante original se ocupa por un electrón más externo con la energía de un tercer electrón que abandona el átomo (Espectroscopía Auger).

b) Emisión característica de rayos X: en este caso, un electrón más externo salta al nivel interno emitiendo una energía que es la diferencia de las energías de los dos niveles y por tanto, es característica de un átomo particular. A partir de esta diferencia de energías, se puede determinar los elementos presentes en cada muestra. Esto constituye la base del microanálisis cualitativo. La medida de la cantidad de rayos X emitidos por segundo nos proporciona el análisis cuantitativo.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **2.2. Conceptos teóricos vibro-acústicos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.2. Conceptos teóricos vibro-acústicos

Uno de los objetivos de la tesis es caracterizar acústicamente el sonido que la cuerda produce en cada uno de los estadios de corrosión de la misma, teniendo en cuenta que el procedimiento experimental se ha desarrollado de forma contrastada para dos casos, uno en el que las cuerdas han sido privadas de protección contra la corrosión y otro en el que las mismas han sido protegidas catódicamente. Por ello y para caracterizar el sonido, es necesario recordar una serie de conceptos que ayudarán a comprender las diferencias acústicas de cada registro.

#### 2.2.1. ¿Qué es el sonido?

Sonido [20] es una vibración mecánica de las partículas de aire que, en contacto con el tímpano, se transmite al oído. A través del oído interno y el nervio auditivo, el cerebro interpreta estas vibraciones para conseguir el resultado final que es sencillamente oír.

La vibración de una partícula implica que esta se mueve, en las proximidades de su posición original, y pasada la vibración, volverá a su posición original. Una vibración es lo que ocurre en la superficie de agua en reposo, si se arroja una piedra. Esta crea una perturbación que avanza y hace que las partículas de la superficie suban y bajen, pero pasada la onda, la partícula sigue donde estaba.

A diferencia del agua, en el aire los movimientos de las partículas son longitudinales, en la dirección de avance del sonido. Si tenemos una superficie que vibra, como puede ser la tapa armónica de una guitarra o el diapasón de pruebas del presente trabajo de investigación, la vibración se transmite a las partículas de aire que están en contacto con su superficie, empujándolas hacia adelante y hacia atrás, estas a su vez empujan a las siguientes de forma que cuando las primeras se retraen, las segundas también lo hacen, la repetición de este fenómeno constituye la propagación la onda por aire.

El sonido se forma mediante las vibraciones mecánicas que llegan al oído interno a través del aire, nuestro oído capta una vibración de frecuencia

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

comprendida entre 20 y 20000 Hz y es el cerebro quien transforma para nosotros estas vibraciones en sonido.

El hercio (Hz) es una unidad de frecuencia que corresponde a un ciclo por segundo. De este modo se llamarían infrasonidos a las vibraciones cuya frecuencia fuese menor de 20 Hz y ultrasonidos a las que oscilan por encima de los 20000 Hz.

Con la producción y propagación de ondas vibratorias, podemos referirnos a las ondas de sonido que pueden propagarse de forma transversal o longitudinal.

De forma transversal, cuando el movimiento es transmitido desde un extremo hasta el otro, o del centro hacia fuera, como las ondas que se forman en el agua cuando se tira una piedra; por el contrario, de forma longitudinal la energía del movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro de la perturbación, así las moléculas de aire individuales que transmiten el sonido se mueven hacia delante y hacia atrás, de forma paralela a la dirección del movimiento ondulatorio.

### **2.2.2. Infrasonido, Sonido, Ultrasonido.**

Tomando la definición de sonido, como aquello que el oído humano es capaz de percibir, habría que limitarlo a las vibraciones de frecuencias comprendidas entre 20 y 20000 Hz. De este modo se llamarían infrasonidos a las vibraciones cuya frecuencia fuese menor de 20 Hz y ultrasonidos a las que oscilan por encima de los 20000 Hz.

### **2.2.3. Umbral de audición.**

El umbral de audición define la mínima presión requerida para excitar el oído. El límite del nivel de presión sonora se sitúa generalmente alrededor de 130 dB, coincidiendo con el umbral del dolor (molestias en el oído). La pérdida de audición de manera súbita, por daños mecánicos (en el oído medio) se produce a niveles muy superiores. La exposición suficientemente prolongada a niveles superiores a 130 dB produce pérdida de audición permanente y otros daños.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

El Umbral de Audición, para la media de los humanos, se fija en 20  $\mu\text{Pa}$  para frecuencias entre 2KHz y 4KHz. Tal y como se desprende de la figura 4 [20], por encima y por debajo de estas frecuencias, la presión requerida para excitar el oído es mayor. Esto significa que nuestro oído no responde igual a todas las frecuencias (tiene una respuesta en frecuencia desigual).

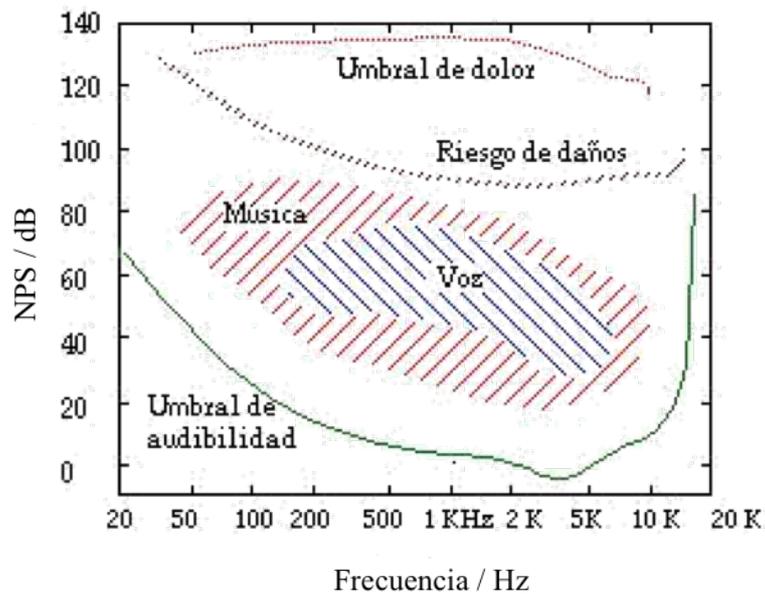


Fig.4. Umbral de audición y límite de dolor para el oído sano.

Un tono puro, a la frecuencia de 125 Hz y con 15 dB de nivel, sería prácticamente inaudible, mientras que, si aumentamos la frecuencia, hasta 500 Hz, sin variar el nivel de presión, se obtendría un tono claramente

audible. En 2 KHz el umbral de audición se fija en 0 dB y a 4 KHz es incluso menor de 0 dB, ya que a 3600 Hz se encuentra la frecuencia de resonancia del oído humano.

Por debajo de 2000 Hz y según se va bajando en frecuencia, el oído se vuelve menos sensible. Los umbrales de audición para frecuencias menores de 2 KHz son: 5 dB a 1 KHz, 7 dB a 500 Hz, 11 dB a 250 Hz, 21 dB a 125 Hz, 35 dB a 63 Hz, 55 dB a 31 Hz. Estos son dB de nivel de presión.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Por encima de los 4 KHz, el oído es menos sensible, pero no tanto como en bajas frecuencias. Sin embargo, se producen fluctuaciones a frecuencias cercanas, debido a las perturbaciones que produce la cabeza del oyente en el campo sonoro. Los umbrales de audición son: 15 dB a 8 KHz y 20 dB a 16 KHz.

Todos los receptores de sonido, tienen un comportamiento que varía con la frecuencia. En el caso del oído humano, sucede lo mismo, ya que se trata el receptor más complicado y eficiente que existe.

En acústica, las frecuencias siempre se tratan de manera logarítmica. El motivo principal es que el oído humano interpreta las frecuencias de manera casi logarítmica. En el eje de frecuencias de cualquier gráfica, las marcas pasan de una frecuencia (p. ej. 1000 Hz) al doble (2000 Hz). La apreciación subjetiva de un oyente será que hay la misma distancia entre un tono de 200 Hz y otro de 400 Hz, que entre uno de 1000 Hz y otro de 2000 Hz. Sin embargo, la "distancia" en frecuencia en el primer caso es de 200 Hz y en el segundo de 1000 Hz.

### 2.2.4. Cómo se mide el sonido.

Las perturbaciones creadas por las vibraciones que afectan al estado de reposo inicial de las partículas de aire, se traducen en variaciones muy pequeñas de presión. Las partículas de aire se acercan y alejan, por efecto de dichas vibraciones se comprimen y se expanden. Estas sensibles variaciones de presión son operadas mediante el Nivel de Presión Sonora (NPS), que se mide en decibelios (dB).

El NPS en decibelios es el resultado de la siguiente operación matemática:

$$NPS = 20 * \log\left(\frac{Presión}{Pref}\right) \quad (4)$$

Siendo  $P_{ref}$  la presión de referencia =  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa. La presión de referencia es la mínima que puede detectar el oído humano medio. Con lo que si tenemos un Nivel de Presión Sonora (NPS) = 0 dB, diremos que hay silencio.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.2.5. Velocidad y presión relativas a la propagación del sonido.

El sonido es una vibración, y como tal, se puede dar en cualquier medio material, sólido, líquido o gaseoso como el aire. En cada medio, se propaga a una velocidad diferente, principalmente en función de la densidad. Cuanto más denso sea el medio, mayor será la velocidad de propagación del sonido. En el vacío, el sonido no se propaga, al no existir partículas que puedan vibrar.

En el aire, el sonido se propaga a una velocidad aproximada de 343 m/s. Esta velocidad puede variar con la densidad del aire, afectada por factores como la temperatura o la humedad relativa. En cualquier caso, para distancias de decenas de metros las variaciones son mínimas.

En el agua, un valor típico de velocidad del sonido son 1500 m/s. En el agua, la densidad varía mucho en función de factores como la profundidad, la temperatura o la salinidad y sí hay que tenerlos en cuenta. En materiales metálicos, el sonido se propaga a velocidades superiores a las anteriores, por ejemplo, en el acero el sonido se propaga a una velocidad en torno a 5000 m/s. En materiales sólidos se utiliza el sonido y las propiedades de reflexión para detectar fallas estructurales y grietas, sin necesidad de tener acceso a toda la estructura. Por ejemplo, en una viga, bastará con acceder a una de sus terminaciones para poder conocer su estado, empleando ultrasonidos y ecogramas.

Divergencia esférica: el nivel de presión disminuye conforme el sonido se propaga. Cuando el frente de ondas es esférico, en la mayoría de los casos, el nivel de presión cae 6 dB por cada vez que se duplica la distancia. Éstas se llaman pérdidas por divergencia esférica. Si por ejemplo se mide el NPS que produce una excavadora a cinco metros y este es de 100 dB, podremos decir que a 20 m el NPS será de 88 dB, y a 40 m serán 82 dB.

Cuando el frente de onda es plano, no hay pérdidas por divergencia. Un ejemplo de este tipo de propagación se da en la propagación del sonido por el interior de una tubería.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.2.6. Timbre, agudeza auditiva y enmascaramiento.

**Timbre.** [21]. De acuerdo a la definición de la ASA (American Standards Association) (1960), el timbre es la sensación auditiva en términos de la cual, un escuchante puede juzgar que dos sonidos presentados de un modo similar y teniendo la misma sonoridad y tono, son distintos. Las diferencias en timbre nos permiten diferenciar la misma nota ejecutada en un piano, un violín o una flauta. El oído humano percibe el timbre en función de las frecuencias que componen la señal escuchada.

**Agudeza auditiva.** Referida a la aptitud o capacidad perceptiva del sentido del oído. Los humanos tenemos buena agudeza auditiva cuando se trata de distinguir frecuencias. En cambio, tenemos una pobre agudeza para localizar la fuente del sonido. Se pueden diferenciar dos tonos, uno de 100 Hz de otro de 101 Hz, pero no uno de 1000 Hz de otro de 1001 Hz. Sin embargo, si se percibe la diferencia entre uno de 1000 Hz y otro de 1010 Hz; esto es debido a la audición logarítmica. La agudeza frecuencial del oído se sitúa en torno al 1%, puede distinguir tonos cuyas frecuencias varían en sólo un 1%.

**Enmascaramiento.** Cuando se encuentra dificultad o imposibilidad para escuchar algún sonido (música, habla...) porque otro sonido (considerado ruido) está presente en el mismo momento, estamos sufriendo enmascaramiento.

### 2.2.7. El espectro de frecuencias.

El espectro es la representación de las frecuencias que componen una señal de audio. El espectro se obtiene calculando la energía que aporta cada frecuencia al sonido total. Normalmente la representación no se hace en términos de energía directamente, sino que se calcula el nivel (10Log) respecto a la energía de referencia.

Con esto se obtiene el "Nivel espectral" expresado en dB. De cara a emplear menos recursos y menos tiempo de cálculo, no se calcula el nivel espectral para cada frecuencia (cerca de 20000) sino que éstas se agrupan en bandas, dando lugar a la representación en "bandas de frecuencia" [20]. Las representaciones se hacen sobre ejes de frecuencia logarítmicos, esto hace

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

que en la representación se vea la misma distancia entre las frecuencias 100 Hz y 200 Hz que entre 1000 y 2000 Hz, como pone de manifiesto la figura 4. La representación espectral (o el espectro) puede resultar muy útil si se sabe interpretar. Básicamente aporta información sobre cuanto contribuye cada frecuencia o cada banda de frecuencia al sonido total. Dicho de otra forma, el espectro permite "ver" el sonido que le llega al oído. Otra cosa diferente será lo que el oído interpreta.

*¿Qué sucede con un sonido original cuya forma de onda ya es senoidal?* Cuando se aplica el teorema de Fourier a una senoide, el resultado es que tiene un solo armónico, de la misma frecuencia que el parcial original, por supuesto. (Nótese que el Teorema de Fourier no dice que todas las formas de ondas deban tener varios armónicos, sino más bien que cualquier forma de onda puede obtenerse por superposición de cierta cantidad de parciales, cantidad que puede reducirse a una sola, que es lo que ocurre con las ondas senoidales.) El hecho de que cada onda senoidal tiene una única frecuencia ha llevado a llamar también tonos puros a las ondas senoidales.

La descripción de las ondas senoidales que componen un sonido dado se denomina espectro del sonido. El espectro es importante debido a varias razones. Primero porque permite una descripción de las ondas sonoras que está íntimamente vinculada con el efecto de diferentes modificadores físicos del sonido. Su utilidad en el presente trabajo es incuestionable, ya que a partir del conocimiento del análisis de espectro de la señal de la cuerda D4 NW026 de una guitarra eléctrica, es posible determinar cómo se verá afectado por el efecto progresivo de la oxidación controlada. No puede decirse lo mismo en el caso en que se conozca sólo la forma de onda.

En segundo lugar, el espectro es importante porque la percepción auditiva del sonido es de naturaleza predominantemente espectral. En efecto, antes de llevar a cabo ningún otro procesamiento de la señal acústica, el oído descompone el sonido recibido en sus componentes frecuenciales, es decir en las ondas senoidales que, según el teorema de Fourier, conforman ese sonido. Por ese motivo, con algo de práctica es posible por ejemplo reconocer las notas de un acorde.

*¿Qué puede decirse del espectro de los sonidos enarmónicos?*

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

El teorema de Fourier puede extenderse al caso de sonidos aperiódicos o enarmónicos. Éstos pueden ser tan simples como los sonidos de una campana o tan complejos como el así llamado ruido blanco (un ruido similar al que capta una emisora de FM en ausencia de señal). En el primer caso, el espectro es discreto, vale decir un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas, aunque no serán ya múltiplos de ninguna frecuencia. Podemos tener, por ejemplo, 100 Hz, 143,3 Hz, 227,1 Hz, 631,02 Hz. En el segundo caso, tenemos todas las frecuencias esto es lo que se denomina un espectro continuo.

### **2.2.8. Espectrograma y análisis en frecuencia.**

El espectrograma se define como la proyección bidimensional de una sucesión de Transformadas de Fourier de tramas consecutivas, donde la energía y el contenido frecuencial de la señal va variando a lo largo del tiempo. El espectrograma muestra la permanencia en el tiempo de las frecuencias durante la vibración, es decir, indica como las señales correspondientes a unas determinadas frecuencias, son las más duraderas desde el inicio de la perturbación hasta la atenuación completa. Los espectrogramas no sólo se utilizan para identificaciones fonéticas o para análisis de sonidos, sino que se utilizan también en muchos otros campos, incluyendo diversas aplicaciones en el campo de la música, el sonar, el radar, el procesamiento de voz, la sismología, etc.

El formato más común es un gráfico de dos dimensiones geométricas en el cual, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la frecuencia; una tercera dimensión que indica la amplitud de una frecuencia particular en un momento determinado, está representada por la intensidad o el color de cada punto en la imagen.

Los ejes de frecuencia y amplitud pueden ser lineales o logarítmicos en función de la aplicación para la que se haya destinado el gráfico. En los espectrogramas definidos para aplicaciones de audio, el eje que representa la amplitud es logarítmico (expresado en dB), mientras que la frecuencia queda representada en el eje homólogo de forma lineal si se desea enfatizar las relaciones armónicas. Por otra parte, si lo que se desea es enfatizar las relaciones musicales o tonales, la frecuencia se expresa de forma logarítmica.

Por otra parte, el análisis en frecuencia, representa la amplitud de las señales a partir de los formantes que son los picos de energía o las zonas más prominentes del espectro, éstos muestran la importancia de las frecuencias presentes en la vibración, destacando las más significativas en cada sonido.

### 2.2.9. La Transformada de Fourier.

En matemáticas, la transformada de Fourier, denominada así por Joseph Fourier, es una aplicación que hace corresponder a una función  $f$ , con valores complejos definida en la recta, con otra función  $g$  definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx \quad (5)$$

Donde  $f$  es  $L^1$ , es decir,  $f$  tiene que ser una función integrable en el sentido de la integral de Lebesgue. El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal.

En la práctica las variables  $x$  y  $\xi$  suelen estar asociadas a dimensiones (como el espacio -metros-, frecuencia -herzios-,...) y entonces es correcto utilizar la fórmula alternativa:

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta\xi x} dx \quad (6)$$

De forma que la constante beta cancela las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Además, tiene una multitud de aplicaciones en muchas áreas de la ciencia e ingeniería: la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales (electrónica), la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir,  $g$  corresponde al espectro de frecuencias de la señal  $f$ .

La rama de la matemática que estudia la transformada de Fourier y sus generalizaciones es denominada análisis armónico.

Son varias las notaciones que se utilizan para la transformada de Fourier de  $f$ . He aquí algunas de ellas:

$$\mathcal{F}[f], \hat{f}, F(f), \mathcal{F}\{f\}.$$

La transformada de Fourier es básicamente el espectro de frecuencias de una función. Un buen ejemplo de eso es lo que hace el oído humano, ya que recibe una onda auditiva y la transforma en una descomposición en distintas frecuencias (que es lo que finalmente se escucha). El oído humano va percibiendo distintas frecuencias a medida que pasa el tiempo, sin embargo, la transformada de Fourier contiene todas las frecuencias contenidas en todos los tiempos en que existió la señal; es decir, en la transformada de Fourier se obtiene un sólo espectro de frecuencias para toda la función.

### 2.2.10. Hipótesis de partida.

#### La onda acústica.

Las ondas acústicas en fluidos son ondas longitudinales, donde las moléculas se mueven de un lado a otro en la dirección de propagación de la onda produciendo zonas adyacentes de compresión y rarefacción. Los fluidos presentan una menor restricción a la deformación que los sólidos, por lo que el cambio de presión que ocurre cuando un fluido se expande o comprime es la única fuerza restauradora capaz de propagar una onda.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En el presente trabajo se asumen las siguientes hipótesis de partida:

1. No se contempla el efecto de las fuerzas gravitacionales.
2. El fluido se supone homogéneo, isótropo y perfectamente elástico.
3. No hay efectos disipadores, como los debidos a la viscosidad o a la conducción de calor.
4. Los cambios de densidad sean muy pequeños comparados con su valor de equilibrio.

El gradiente de presión se relaciona con la velocidad del fluido mediante la ecuación:

$$\frac{\partial \{u\}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (7)$$

Donde  $\{u\}$  es la velocidad de la partícula en cada posición,  $\rho_0$  es la densidad del fluido y  $p$  es la presión.

Considerando un caso unidimensional, a partir de la ecuación (7), se obtiene la ecuación linealizada de Euler:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

## Densidad de energía.

La energía transportada por las ondas acústicas a través de un medio fluido es de dos formas, la energía cinética y la potencial. Si se considera un pequeño elemento de fluido con un volumen lo suficientemente grande para contener millones de moléculas y por otro lado lo suficientemente pequeño para considerar que las variables acústicas son casi constantes en todo el elemento de volumen, la energía cinética de ese elemento vendría dada por:

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_0 V_0 \{u\}^2 \quad (9)$$

Donde  $\rho_0 V_0$  es la masa del elemento.

La energía potencial debida a un cambio de volumen es:

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{p^2}{\rho_0 c_0^2} V_0 \quad (10)$$

Donde  $c_0$  es la velocidad del sonido en el medio.

La densidad instantánea de energía se obtiene dividiendo por el volumen  $V_0$ , la energía total del elemento:

$$e = \frac{E_c + E_p}{V_0} \quad (11)$$

## **2.3. Conceptos teóricos psicoacústicos.**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.3. Conceptos teóricos psicoacústicos.

#### 2.3.1. Introducción.

El oído es un órgano o conjunto de órganos encargados de la percepción de sonidos. Su estructura física y química influye en la manera en que la sensación sonora es percibida por el cerebro, y por ello estas sensaciones difieren de las apreciaciones objetivas de un sensor de presión sonora o micrófono.

Por ello, dado que este estudio trata en cierta medida de la música, se realizarán mediciones de registros sonoros acústicos y también psicoacústicos, para tener un mayor número de datos con los que llegar a mejores conclusiones.

Generalmente el oído humano es capaz de percibir sonidos entre 20 y 20000 Hz. Los sonidos por encima de 20000 Hz o por debajo de 20 Hz se estima que no son audibles por el oído humano y se les denomina respectivamente ultrasonidos e infrasonidos.

Por otro lado, el oído humano también tiene límites en el nivel de presión para cada una de las frecuencias, nivel que además va cambiando con los tipos y edad de las personas. El umbral inferior de presión sonora se sitúa en los 0'00002 Pascal o  $N/m^2$ .

#### 2.3.2. Parámetros de medida del sonido.

Los sonidos se caracterizan por una serie de componentes a distinta frecuencia y presión, y se pueden representar mediante una gráfica frecuencia-amplitud denominada espectro de frecuencias, pero la percepción humana del sonido depende de gran cantidad de factores. Esta es por tanto la diferencia entre acústica y psicoacústica.

Los denominados criterios o parámetros [22] psicoacústicos son indicadores que objetivan diferentes características de un sonido. Los más relevantes y

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

que pueden tener influencia en este trabajo son la sonoridad, la agudeza, la rugosidad o aspereza, la fuerza de fluctuación y la tonalidad.

### 2.3.2.1. Sonoridad (*Loudness*).

La sonoridad [23] es un parámetro de percepción del sonido. Se vincula a la intensidad o energía que transmite la onda sonora. La sonoridad es la magnitud psicoacústica más básica, describe generalmente mejor el nivel de sonido percibido que el nivel de presión sonora [24].

La unidad que mide esta magnitud se obtuvo de un experimento estadístico del volumen percibido de distintos registros acústicos a diferentes frecuencias y niveles de presión. Fue un tono de 1 kHz de frecuencia a 1 dB y se le denomina "*fonio*". De este modo un sonido que se perciba de la misma intensidad que un sonido de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 40 dB tiene una sonoridad de 40 fonios.

Sin embargo, posteriormente se elaboró y mejoró una nueva escala subjetiva que tenía en cuenta otros aspectos y cuya unidad es el "*sonio*".

La expresión que define el número de sonios que equivalen a fonios es:

$$N_S = 2^{\frac{N_F - 40}{10}} \quad (12)$$

Siendo  $N_F$  el número de fonios.

Por tanto, el sonio es la sonoridad de un sonido de 1 kHz y 40 dB de nivel de presión sonora. La sonoridad en sonios, se rige por la expresión:

$$N = \int_0^{24\text{bark}} N' dz \quad (13)$$

Teniendo en cuenta que  $z$  es función de la banda crítica medida en Bark, y que el Bark es la unidad psicoacústica, y responde a las primeras 24 bandas críticas de un sonido con centro en las frecuencias: 0, 100, 200, 300, 400,

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4400, 5300, 6400, 7700, 9500, 12000, 15500 Hz.

Estudios realizados sobre un gran número de oyentes ha permitido tabular un conjunto de curvas de igual sonoridad (curvas isofónicas) que indican, para cada nivel de sonoridad, el nivel sonoro de los distintos tonos puros que producen la misma sensación sonora. En la figura 5 se representan las curvas de igual sonoridad, según ISO 532 B: 1975.

Cada curva indica los valores del nivel de presión sonora y de frecuencia que corresponden a una misma sonoridad. Puede verse que para sonoridades bajas (menores de 40 phons), el oído necesita más presión acústica cuando la frecuencia es de 31.5 Hz que cuando es de 1000 Hz. Esta diferencia se va acortando para niveles altos de sonoridad, esto implica que, para altos niveles de sonoridad, la relación nivel de presión-frecuencia se va haciendo más lineal.

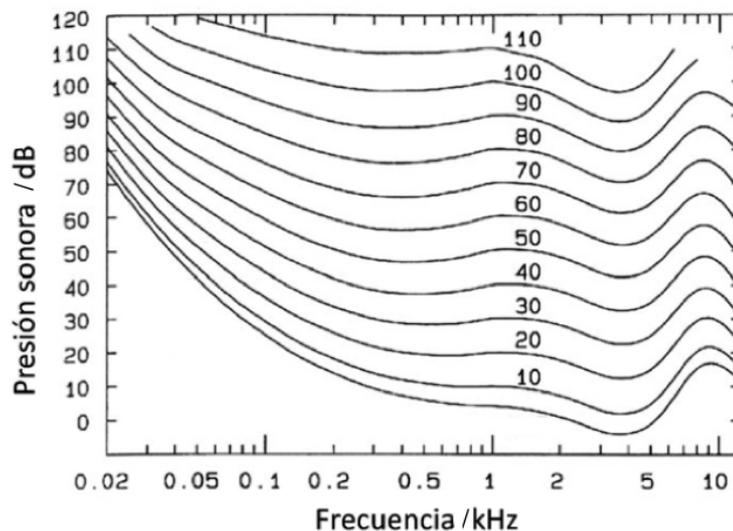


Fig.5. Curvas isofónicas en phons.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 2.3.2.2. Agudeza (*Sharpness*).

La agudeza mide el contenido frecuencial de un sonido y representa un atributo para la evaluación del timbre [26] que describe el color tonal del sonido. Cuanto mayor es la proporción de altas frecuencias, más agudo se percibe el sonido, se define un sonido de agudeza 1 acum como un ruido de banda estrecha, de ancho igual a una banda crítica, centrado en la frecuencia de 1 kHz, y que tiene un nivel de 60 dB.

El valor de la agudeza se calcula con la ecuación:

$$S_{ag} = c_t \frac{\int_0^{24\text{bark}} N' g'(z) dz}{\int_0^{24\text{bark}} N' dz} \quad (14)$$

Donde  $c_t = 0.11$  y  $g'(z)$  es una función de ponderación que depende de  $z$  según:

$$z \leq 14 \Rightarrow g'(z) = 1$$

$$z \geq 14 \Rightarrow g'(z) = 0.00012z^4 - 0.0056z^3 + 0.1z^2 - 0.81z + 3.51$$

$g'(z)$  tiene en cuenta el hecho de que los componentes por encima de 3 kHz ( $z > 14$ ) [23] contribuyen más al valor de agudeza que los de baja frecuencia.

La agudeza es uno de los parámetros psicoacústicos más importantes debido a su influencia considerable en el desagrado de sonidos. Los sonidos con altos valores de agudeza son evaluados como más desagradables y [25] molestos.

### 2.3.2.3. Aspereza o rugosidad (*Roughness*).

La aspereza considera la percepción subjetiva de las modulaciones de amplitud entre 20 y 300 Hz de un sonido. La unidad que la cuantifica es el "asper" que se define como un tono de 60 dB de nivel de presión sonora y frecuencia central 1 kHz, modulado 100% en amplitud y con una frecuencia de modulación de 70 Hz. [27]. Si una señal modulada contiene un alto valor

---

de rugosidad, es considerablemente más desagradable independientemente del nivel de presión sonora ponderado en A [28].

La expresión propuesta es:

$$R_{ug} = cal \sum_{i=1}^{24} g'(z) m_i^* dz \quad (15)$$

Siendo *cal* un factor de calibración,  $m_i^*$  un índice de estimación de cada banda de Barks, y  $g'(z)$  una función de ponderación

### 2.3.2.4. Tonalidad (Tonality).

La tonalidad de un sonido significa que éste contiene uno o más componentes prominentes tonales. Mide cuantos tonos puros pueden ser encontrados en el espectro del ruido. Este parámetro da información sobre la naturaleza armónica del sonido, por ejemplo, un ruido aleatorio tiene una densidad espectral de potencia distribuida por todas las bandas, por lo que presenta una tonalidad baja.

Los sonidos tonales intensifican generalmente la impresión agradable de un sonido.

La tonalidad permite definir un sonido como alto o bajo dentro de una escala. Depende sobre todo de la frecuencia, de la presión sonora y de la forma de onda del sonido. La tonalidad es una magnitud subjetiva, y la frecuencia una magnitud física pero la relación de variación de ambas no es igual.

Como ejemplo, si se pasa de un tono de 1 kHz a otro de 2 kHz, la sensación que se percibe no es igual que si se pasa de 4 kHz a 5 kHz, aunque se haya aumentado 1 kHz en los dos casos.

La unidad de medida de la tonalidad es el "mel", de modo que un sonido de 1 kHz de frecuencia y 40 dB de nivel de presión sonora tiene un tono de 1000 mels. Otra apreciación que distingue la tonalidad del tono es, por ejemplo, que en la zona inferior a las frecuencias medias cada octava viene a tener una extensión de 200 mels, mientras que, para frecuencias más altas las

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

octavas tienen extensiones mayores, del orden de 700 mels. Entre 0 y 16 kHz contiene 2400 mels.

Puede utilizarse la escala de Barks, estableciéndose la siguiente equivalencia entre mels y Barks: 1 Bark equivale a 100 mels.

### 2.3.2.5. Sensación de agrado.

Los parámetros psicoacústicos: sonoridad, agudeza, tonalidad y aspereza, dan una indicación de la naturaleza del ruido y de su percepción humana. Pero sería interesante la posibilidad de obtener una descripción general. Así pues, se propone un parámetro nuevo llamado sensación de agrado para medir la calidad del sonido, entendida como agradabilidad, que puede ser cuantificada de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{A_g}{A_{go}} = e^{-0,7 \frac{R_{ug}}{R_{ugo}}} \cdot e^{-1,08 \frac{S_{ag}}{S_{ago}}} \cdot \left( 1,24 - e^{2,43 \frac{T_{on}}{T_{ono}}} \right) \cdot e^{-\left( \frac{0,023 \cdot N}{N_0} \right)^2} \quad (16)$$

Donde  $A_g$  es la agradabilidad,  $R_{ug}$  es la rugosidad (aspereza),  $S_{ag}$  es la agudeza,  $T_{on}$  es la tonalidad, y  $N$  es la sonoridad percibida. La unidad de medida de la sensación de agrado es el "puf" (pleassantness units)

### 2.3.2.6. Fluctuación (*Fluctuation Strength*).

Las fluctuaciones periódicas con modulación a frecuencias menores de 20 Hz son reconocidas por el oído como cambios del volumen (percepción subjetiva que el ser humano tiene de la potencia de un determinado sonido en el tiempo). La sensación causada por este hecho es definida como fluctuación. Hay que tener en cuenta que la fluctuación y la rugosidad son parámetros que caracterizan la percepción de dos fenómenos físicos similares.

Si la modulación es rápida (frecuencias entre 20 y 300 Hz), se percibe un cambio en la frecuencia fundamental con respecto al tiempo. Si la modulación es lenta (menor de 20Hz), la sensación percibida se corresponde con un cambio en el nivel del sonido o fluctuación. En general las señales con mayor

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

fluctuación son más molestas que las señales con mayor rugosidad [29]. El parámetro fluctuación tiene como unidad de medida el vacil.

### 2.3.3. Armónicos obtenidos a partir de las condiciones iniciales.

Como es conocido, [30] la propagación de las perturbaciones en una cuerda fuerte, de sección muy pequeña y de longitud fija  $L_0$  entre dos soportes rígidos, tan sólo depende de la tensión soportada  $T_0$  y de la masa (expresada mediante la distribución por unidad de longitud  $\mu$ )

Así pues, para la cuerda D4 NW026 utilizada, 147Hz es la frecuencia más baja producida en una perturbación y se denomina fundamental, así mismo, los modos de las frecuencias más altas, denominados sobretonos, se pueden calcular a partir de la expresión que relacionan los parámetros expuestos:

$$f = \left( \frac{n}{2L_0} \right) \sqrt{(T_0/\mu)} \quad (17)$$

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

<i>Modos de vibración / frecuencias</i>			
$n =$	1	$f =$	147,005 Hz
$n =$	2	$f =$	294,01 Hz
$n =$	3	$f =$	441,015 Hz
$n =$	4	$f =$	588,02 Hz
$n =$	5	$f =$	735,025 Hz
$n =$	6	$f =$	882,03 Hz
$n =$	7	$f =$	1029,04 Hz
$n =$	8	$f =$	1176,04 Hz
$n =$	9	$f =$	1323,05 Hz
$n =$	10	$f =$	1470,05 Hz
$n =$	11	$f =$	1617,06 Hz
$n =$	12	$f =$	1764,06 Hz
$n =$	13	$f =$	1911,07 Hz
$n =$	14	$f =$	2058,07 Hz
$n =$	15	$f =$	2205,08 Hz

Tabla 1. Detalle de las frecuencias relativas a los 15 primeros modos de vibración.

La solución general armónica para el sistema vibrando libremente, será la suma de todos los modos de vibración. Resulta interesante destacar desde el punto de vista de la psicoacústica, que todas estas parciales (fundamental y sobretonos) que se propagan a través de las cuerdas, formarán un sonido complejo que nuestro oído analizará en función de sus componentes armónicas simples.

En este orden de cosas, se puede afirmar que nuestro oído percibirá una sensación acústica agradable dependiendo de la relación entre las frecuencias de los sonidos y no de sus valores absolutos.

Puestos a comparar las frecuencias que suenan simultáneamente bien o no, se definirá como intervalo, al cociente entre las frecuencias comparadas

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

(situando la mayor en el numerador), de tal modo que la sensación placentera aumentará cuanto más sencillo sea el intervalo entre dos sonidos.

Así pues, un intervalo de octava alta guardará la relación:  $\frac{f_2}{f_1} = \frac{2}{1}$ ;

Análogamente, un intervalo de quinta tendrá este aspecto:  $\frac{f_2}{f_1} = \frac{3}{2}$ ;

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Capítulo 3. Procedimiento experimental**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **3.1. Justificación general de la metodología de trabajo**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 3.1. Justificación general de la metodología de trabajo

La presente tesis doctoral tiene un carácter interdisciplinar, en donde se ha pretendido establecer una relación cuantitativa entre el grado de deterioro, principalmente como consecuencia de la corrosión, de las cuerdas metálicas de instrumentos musicales y su repercusión en las propiedades acústicas de éstas.

Este estudio ha sido útil para entender la relación entre estado de corrosión y vida útil de estos materiales, y ha permitido establecer estrategias para aumentar la durabilidad de éstos. Sobre la base de esta investigación, se ha llevado a cabo el estudio de mecanismos de protección frente a la corrosión en dichos instrumentos de cuerda pulsada.

La hipótesis de partida se basa en que la composición química de las cuerdas influye en las cualidades del sonido. Por lo tanto, puede afirmarse que el proceso de corrosión influye en gran medida: en las características del sonido y en el deterioro de las muestras metálicas.

Para el caso de las cuerdas, se han elegido inicialmente muestras comerciales de cuerdas de guitarra eléctrica D4 NW026 D'Addario.

Las muestras se han sometido a procesos de corrosión controlada, utilizando para ello disoluciones que simulan la composición electrolítica del sudor humano (para lo cual se han aplicado las normas UNE-EN 1811:1999+A1 y UNE-EN ISO 17700).

Previamente las muestras se han tratado para eliminar cualquier rastro de contaminación o impureza superficial, y garantizando de este modo la reproducibilidad de las medidas.

Posteriormente, las muestras se han sometido a un proceso experimental de protección catódica mediante ánodos de sacrificio y corriente impresa con objeto de aumentar la durabilidad de las cuerdas frente a la corrosión.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Las muestras ensayadas se han extraído a distintos tiempos de las disoluciones con objeto de medir: el estado de corrosión, los cambios en la composición superficial, los cambios en la composición de la disolución test y los cambios en sus propiedades vibro-acústicas.

La medida del estado de corrosión [13-16,19] de las muestras se ha realizado mediante la comparación de las señales obtenidas mediante la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS).

Las medidas se han llevado a cabo en estado sólido de modo longitudinal y en disolución.

También se han realizado medidas gravimétricas para determinar la pérdida de masa por corrosión validando así las medidas realizadas mediante EIS.

Análogamente se han realizado ensayos en corriente continua en el seno de la disolución de sudor sintético mediante las técnicas de Resistencia de polarización ( $R_p$ ).

Durante la fase inicial (en la que se estableció la correspondencia entre los parámetros electroquímicos y la caracterización acústica) se analizaron los cambios morfológicos, en primer lugar, con un equipo FESEM (con fracciones de las muestras ensayadas, al final del proceso de corrosión).

De igual modo los cambios en la composición superficial se determinaron mediante la técnica de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX), que es una técnica acoplada al FESEM.

En lo relativo a los cambios en la composición de la disolución test, durante la fase inicial en la que se estableció la correlación entre cada estado de corrosión en las cuerdas y su correspondiente caracterización acústica, la concentración de iones hierro disueltos procedentes de la oxidación de las muestras se ha obtenido mediante la aplicación de la norma ISO 6685-1982 (o-fenantrolina).

Finalizado el proceso experimental, se procedió a una limpieza mecánica cuidadosa de los electrodos con el fin de eliminar los productos de corrosión, utilizando además como decapante una disolución 1 g/l de

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

hexametilentetramina en ácido clorhídrico 1 M, con el fin de disolver los óxidos de Fe producidos durante el ataque.

A continuación, se sometieron las cuerdas a un baño con acetona en ultrasonidos y posteriormente se secaron y pesaron registrándose la diferencia de la masa de hierro producido entre las cuerdas protegidas y la cuerda de referencia privada de protección.

Para poder determinar la relación entre el estado de corrosión de las muestras ensayadas y su comportamiento vibro-acústico, cada vez que se extraían las muestras del medio corrosivo y de forma previa a los ensayos de corrosión no destructivos ( $R_p$  y EIS), se ensayaban las propiedades vibro-acústicas de éstas.

Para caracterizar el comportamiento vibracional de las cuerdas se realizaron medidas de presión acústica. Para ello se construyó un banco de ensayo acústico de cuerdas. En el banco de ensayos las cuerdas se sometían a una tensión de tracción de 89N quedando afinadas a la frecuencia del modo de vibración fundamental correspondiente a 147Hz.

Al estudiar la vibración de cada una de las cuerdas, se aisló su señal, manteniéndola fuera de la influenciada de otros modos de vibración o armónicos provenientes de otros elementos. Por ello el banco de ensayos se construyó cumpliendo adecuadamente los requisitos expuestos. Las muestras se ensayaron con un sistema de apoyos reproducible y simulable.

Las medidas de presión acústica se realizaron en un entorno anecoico utilizando micrófonos de presión de campo abierto. La excitación de la cuerda se realizó con un sistema de pulsación reproducible.

Las señales correspondientes a las medidas de presión acústica se procesaron para determinar su contenido en frecuencia mediante la FFT (Fast Fourier Transform), de este modo se consiguió determinar el grado de deterioro caracterizado por el cambio en el contenido armónico de las muestras en las sucesivas fases del ataque corrosivo, comparando las amplitudes y la presencia de armónicos.

Dado que la FFT no proporciona información sobre el eje temporal, del proceso experimental se obtuvo también el espectrograma acústico. El

---

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

espectrograma muestra como la densidad espectral de la señal varía con el tiempo, siendo una herramienta muy utilizada en el estudio de la fonética humana, de los sonidos no articulados emitidos por los animales y de la acústica de los instrumentos musicales. En este caso ha posibilitado el estudio de la variación del contenido armónico del sonido de las cuerdas respecto del tiempo. Y ello en las sucesivas fases de corrosión.

Por otro lado, es un hecho conocido para cualquier músico profesional o aficionado el cambio que se produce en las cualidades acústicas de las cuerdas sometidas a un proceso de corrosión. Esta percepción sonora siempre es muy subjetiva y depende del oído de cada persona. Con el fin de objetivar la percepción sonora de la transformación de las cualidades del sonido producida en las sucesivas fases del ataque corrosivo se determinaron los parámetros psicoacústicos.

La psicoacústica es una rama de la psicofísica que estudia la relación existente entre el estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca. Estudia la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hace de ellas el cerebro. En nuestro caso se determinaron para cada fase de corrosión de la cuerda cuatro parámetros psicoacústicos básicos: sonoridad, agudeza, rugosidad, tonalidad y fluctuación.

**3.2. Procedimiento experimental electroquímico**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 3.2.1. Procedimiento experimental aplicado a la caracterización vibro-acústica de las cuerdas en función de su estado de corrosión

#### a) Materiales y compuestos químicos

Para el desarrollo de la fase experimental se emplearon los siguientes reactivos: acetato sódico anhidrido (puro) elaborado por Probus. Ácido ascórbico (99%), 1,10-hidrato-1 de fenantrolina (100%), amoníaco (25%), cloruro de sodio (99.5%), urea cristalizada (99-100%), acetona (99.5%) y ácido nítrico (65%) fabricado por Panreac.

Ácido láctico (90%) suministrado por Fluka. Agua ultrapura proporcionada por Millipore-Milli-Q system con una resistividad cercana a 18.2 Mohms.cm. Todos los potenciales fueron referidos al electrodo de referencia Ag/AgCl (3M KCl). Para eliminar el oxígeno se burbujeó nitrógeno gas a través de la disolución.



Fig.6. Microfotografía de una cuerda de guitarra eléctrica D4 NW026 obtenida mediante FESEM [2].

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

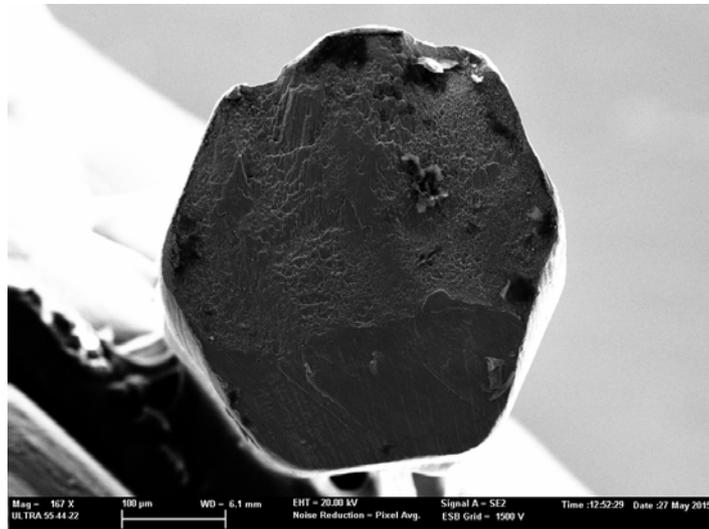


Fig. 7. Microfotografía de la sección transversal hexagonal del alma de acero de una cuerda de guitarra eléctrica D4 NW026 obtenida mediante FESEM [2].

Las cuerdas de guitarra empleadas en el proceso experimental están formadas por dos cables. El primero, constituye el alma de acero para cuerdas de instrumentos musicales, mecánicamente resistente, soporta el esfuerzo axial de la cuerda sometida a la tensión propia de su afinación para un modo de vibración fundamental de 147 Hz. Este cable posee una microcubierta de estaño y su sección transversal es hexagonal. El segundo cable es de acero al carbono y su sección transversal es circular. Este cable tiene una microcubierta de níquel y se encuentra arrollado al anterior. [2,4]

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

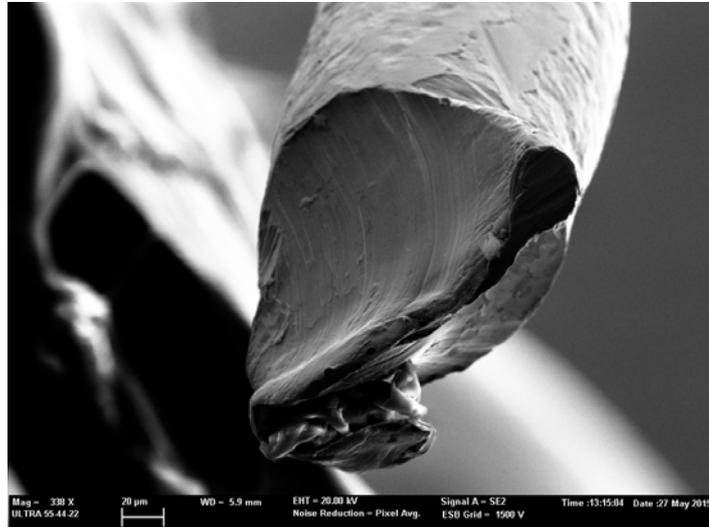


Fig. 8. Microfotografía de la sección transversal circular del cable de acero al carbono que permanece arrollado al alma de acero de la cuerda obtenida mediante FESEM [2].

La figura 6, la figura 7 y la figura 8 muestran microfotografías de la cuerda [2]. El diámetro de la cuerda es de 0,61mm. La composición química del alma de acero, obtenida mediante análisis EDX con patrones de acero, de una cuerda D4 NW026 D'Addario nueva expresada en su porcentaje en masa (%) es la siguiente: Fe 98.77, Mn 0.52, C 0.41, Si 0.30. Así mismo el porcentaje en masa (%) del arrollamiento es: Fe 73.95, Si 15.78, C 10.56.

### **b) Equipamiento electroquímico y procedimiento experimental electroquímico**

Las cuerdas fueron sometidas a tratamiento con acetona en baño de ultrasonidos y después fueron secadas, a continuación, se sometieron a un proceso de corrosión controlada utilizando disoluciones que simulaban la composición electrolítica del sudor humano, de acuerdo con la norma UNE-EN 1811:1999+A1 y la norma EN ISO 17700.

La composición química del sudor humano artificial expresada en porcentaje en masa disuelto en agua fue la siguiente: Cloruro de sodio 0.5%, ácido láctico 0.1% y urea 0.1%. Se diluyó amoníaco 1% hasta alcanzar un pH del  $6.5 \pm 0.1$ .

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En este primer trabajo experimental la concentración del sudor artificial expresada en la norma se diluyó hasta una décima parte, Los resultados obtenidos en previos procesos experimentales en los que se utilizó de forma literal la concentración expresada en la norma provocaron la rotura de las cuerdas a los siete días del proceso de corrosión controlada. La nueva disolución menos concentrada proporcionó un período de tiempo superior para tomar las medidas necesarias y obtener de este modo suficiente información experimental para su correspondiente análisis.

En cada proceso experimental se utilizaron tres tubos de silicona y tres cuerdas D4 NW026 D'Addario idénticas. Cada tubo de silicona fue herméticamente cerrado, alojando en su interior a cada una de las cuerdas sometidas a análisis de forma que éstas permanecieron sumergidas en la disolución de sudor humano sintético.

La figura 10 muestra este montaje experimental. Un par de pinzas de acero mantienen herméticamente cerrado el tubo de silicona en sus extremos. Una longitud de 44 cm de cuerda fue sumergida en la disolución de sudor artificial. Cada tubo almacenó individualmente un volumen de 44 ml del electrolito.

Las cuerdas fueron extraídas de las disoluciones a lo largo del proceso de corrosión, concretamente a los 3, 7, 14 y 17 días de exposición, tras ser secadas cuidadosamente para no alterar su morfología superficial, se realizaron las siguientes medidas:

1. Medidas longitudinales en seco para estimar la resistividad eléctrica de las cuerdas. Para ello se conectaron los extremos de la cuerda (70 cm de longitud) mediante unas pinzas a un potencióstato-galvanostato Ecochemie Autolab PGSTAT302.
2. La velocidad instantánea de corrosión  $i_{corr}$  de las muestras sumergidas en la disolución de sudor artificial se determinó mediante la técnica de resistencia de polarización ( $R_p$ ). Al final del periodo experimental también fueron obtenidas las curvas de polarización.
3. La caracterización eléctrica mediante la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

4. Medidas gravimétricas.
5. La morfología de las muestras se determinó mediante un FESEM Ultra Zeiss 55, aplicando un voltaje de aceleración de 3 kV. Se llevaron a cabo medidas de energía dispersiva de rayos X (EDX) entre 0 y 20 kV.
6. La correlación entre el grado de corrosión y las propiedades vibroacústicas.

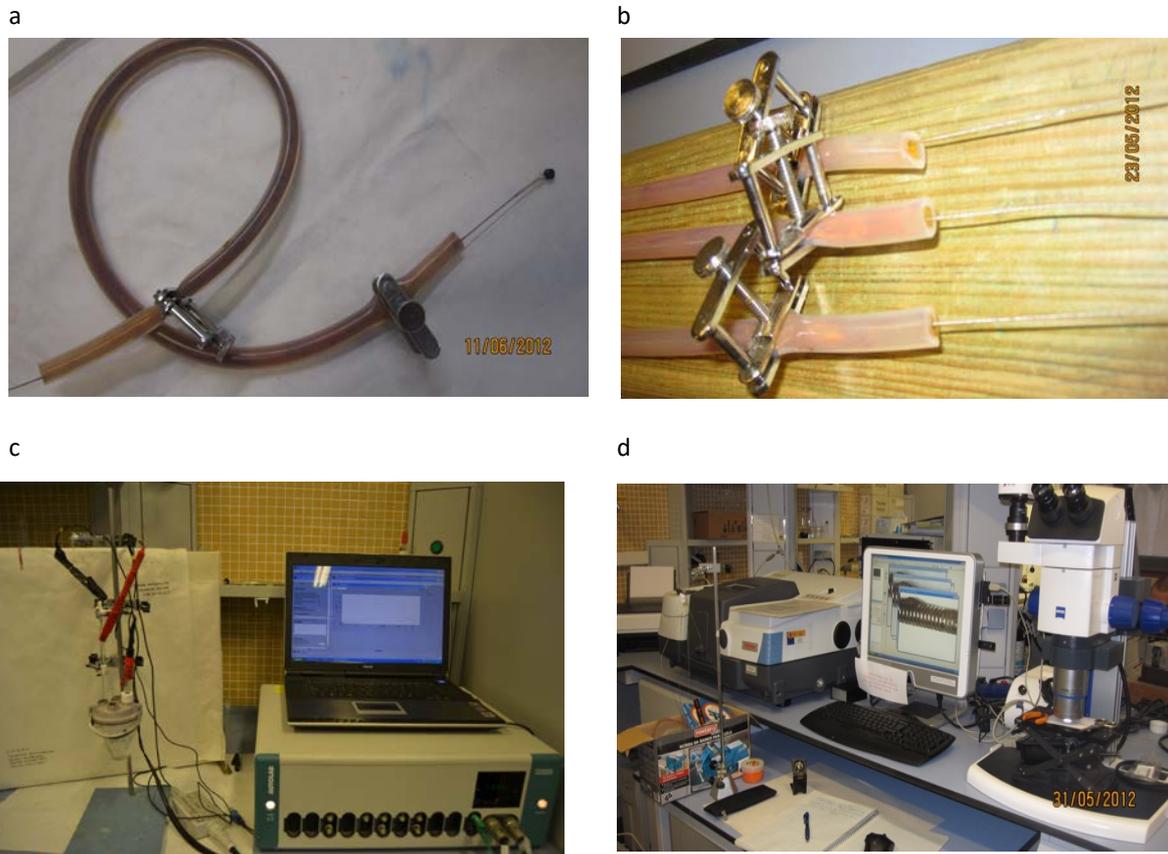


Fig. 9. Fotografías del trabajo experimental en la fase de caracterización: (a) cuerda en interior del tubo de silicona con disolución y pinzas de cierre. (b) cuerdas durante proceso de corrosión sumergidas en sudor sintético y sometidas a 89 N de tensión por tracción en el interior de los tubos de silicona. (c) Análisis de EIS y de  $R_p$ , detalle de la celda troncocónica y del potencióstato. (d) Análisis de la morfología superficial de las cuerdas oxidadas mediante microscopía.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---



Fig.10. Celda electroquímica y dispositivo de cierre y sujeción.

Para llevar a cabo las medidas en disolución, una vez extraídas las cuerdas de los tubos, una longitud correspondiente a 3 cm de cada cuerda se sumergió en 30 ml de disolución de sudor artificial. Para este fin se utilizaron celdas de trabajo de vidrio de la casa comercial Metrohm. Como puede apreciarse en la fotografía de la figura 10, las celdas poseen un cuerpo troncocónico y se cierran con un dispositivo de sujeción a presión.

El dispositivo de cierre dispone de varios orificios a través de los cuales se introdujeron: las muestras comerciales de cuerdas para guitarra eléctrica D4 NW026 D´Addario utilizadas como electrodos de trabajo, como contraelectrodo se utilizó un hilo de platino de 0.5 mm de diámetro y un electrodo de referencia Ag/AgCl (3M KCl).

Teniendo en cuenta que la presencia de pequeñas cantidades de impurezas, especialmente de tipo orgánico, afecta al comportamiento electroquímico de los electrodos de trabajo, es necesario realizar la limpieza de las celdas antes de cada experiencia. El procedimiento es el siguiente: Las celdas, se sumergen en disolución de  $\text{KMnO}_4$  en medio básico ( $\text{NaOH}$ ) durante 24 horas. A continuación, se extraen de la disolución oxidante y se lavan con agua oxigenada diluida y levemente acidificada ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). De esta forma se obtienen como productos  $\text{O}_2\uparrow$  y sales de Mn(II), no perjudiciales para el medio ambiente. Seguidamente las células se enjuagan abundantemente con agua ultrapura.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

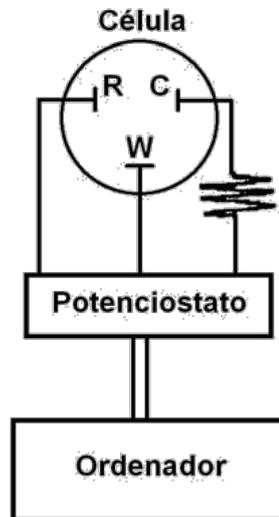


Fig.11. Esquema general de la disposición de equipos y célula en las medidas experimentales en presencia de disolución de sudor humano sintético.

Así pues, el montaje experimental empleado para llevar a cabo las medidas en presencia de la disolución de sudor humano sintético, ha partido de una celda de tres electrodos conectada a un potenciostato/galvanostato Autolab modelo PGSTAT30. el potencial aplicado se ha variado con una velocidad de  $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ . Como software se ha utilizado el programa informático General Purpose Electrochemical System (GPES) versión 4.9 suministrado por la casa comercial.

La figura 11 muestra el diagrama de bloques correspondiente al montaje experimental para las medidas en disolución de sudor sintético.

Las medidas de  $R_p$  se realizaron a  $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$  de velocidad de barrido mientras que las medidas de EIS se llevaron a cabo abarcando un rango de frecuencias entre  $10^4$  y  $10^{-2}$  Hz. La amplitud de la onda sinusoidal de voltaje fue  $\pm 10 \text{ mV}$ . Cada medida se desarrolló a un potencial constante equivalente al establecido inicialmente a circuito abierto en el experimento.

Para analizar cuantitativamente el comportamiento electroquímico de las muestras, los datos de impedancia obtenidos experimentalmente, fueron modelizados y ajustados a circuitos eléctricos constituidos por elementos pasivos.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Los cálculos se llevaron a cabo mediante el método de ajuste no lineal por mínimos cuadrados en el plano complejo. Para esta tarea se utilizó el programa ZPlot/ZView (versión 3.1c) desarrollado por Scribner Associates Inc, Southern Pines, NC, USA.

### **3.2.2 Procedimientos experimentales aplicados al control de la corrosión mediante protección catódica por ánodo de sacrificio y por corriente impresa.**

#### **a) Materiales y compuestos químicos**

Para todo el desarrollo de la fase experimental mediante protección catódica se ha empleado una disolución sintética estándar equivalente al sudor humano según la norma UNE-EN 1811:1999+A1 y la norma EN ISO 17700. La relación de reactivos y sus correspondientes concentraciones y proveedores ya han sido detallados en la fase de caracterización electroquímica y acústica de las cuerdas.

Como electrolito conductor iónico para la protección catódica se ha utilizado: nitrato potásico 0,1 M, 99% de Panreac (Reag.Ph.Eur).

Para la disolución decapante se ha empleado una disolución 1 g/l de hexametilentetramina 98% de Prolabo en ácido clorhídrico 1 M, 37% de Merck con grado de pureza analítico.

Las cuerdas de guitarra empleadas en los procesos experimentales de protección catódica, son muestras comerciales de cuerdas para guitarra eléctrica D4 NW026 D´Addario semejantes a las ya utilizadas durante la fase de caracterización [2,4], así mismo, para el proceso experimental de protección catódica mediante ánodo de sacrificio, se han empleado como ánodos dos placas de zinc de 2x8 cm<sup>2</sup>.

Por otra parte, dos fuentes de alimentación de corriente continua BLAUSONIC 0-30V 2.5A han proporcionado el potencial y la intensidad de corriente eléctrica necesarios para poner en marcha experimentalmente la protección catódica por corriente impresa. Para supervisar los valores de la diferencia de potencial y de la corriente en distintos puntos del circuito durante el proceso experimental, se han empleado multímetros PROINSA 3511927 y GOLDSTAR DM-311. Además, mediante un electrodo de referencia de Ag/AgCl (3M) en contacto con el electrolito conductor se realizaron diversas medidas eléctricas de control.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Para simular las condiciones de trabajo real, las cuerdas se han mantenido afinadas en su frecuencia fundamental de 147Hz durante todo el ataque corrosivo mediante un dispositivo KORG GA-30.

a



b



c



d

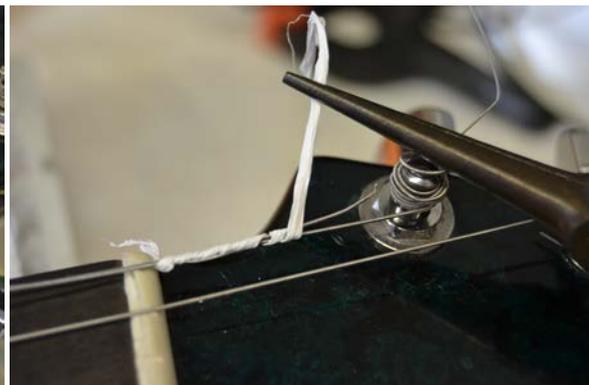


Fig. 12. Fotografías del montaje experimental en la fase de protección catódica: (a) fuentes de alimentación. (b) anclaje del extremo inferior de cuerdas aisladas individualmente mediante Teflón. (c) anclaje superior de las cuerdas al clavijero. (d) fijación del extremo de la cuerda (cátodo) que se introducirá en la disolución de nitrato potásico

### **b) Equipamiento electroquímico y procedimiento experimental electroquímico**

Como nota previa cabe indicar que los datos relacionados con las especificaciones técnicas de los equipos, instrumental y concentraciones de los reactivos empleados, sólo se han indicado explícitamente si en el anterior capítulo relativo a la caracterización electroquímica y vibro-acústica de las cuerdas no se han detallado. Las figuras 12, 13, 14 y 15 presentan las fotografías más relevantes del equipamiento y del procedimiento experimental electroquímico.

En ambos procesos experimentales de protección catódica, se ha optado por una disolución de nitrato potásico 0.1M como electrolito conductor. En los trabajos desarrollados para obtener la protección catódica mediante ánodo de sacrificio, el electrolito sólo ha entrado en contacto directo con el ánodo de zinc y uno de los extremos de la cuerda de guitarra (cátodo), mientras que, en la ejecución de las tareas relativas a la protección catódica por corriente impresa, el electrolito ha entrado en contacto con un extremo de la cuerda (cátodo) y con un filamento de platino actuando como ánodo.

En el proceso, las cuerdas D´Addario D4 NW026 han sido sometidas simultáneamente al mismo baño corrosivo con sudor humano sintético según la misma norma empleada en la fase de caracterización, en esta nueva fase experimental se ha optado por no sumergir las cuerdas en la disolución de sudor diluido, dentro de los tubos de silicona.

Con objeto de poner en marcha un proceso experimental que reprodujera con mayor fidelidad las condiciones reales, cada cuerda ha sido impregnada homogéneamente en toda su extensión mediante un algodón empapado en sudor humano sintético.

En un caso, una de ellas se ha protegido catódicamente mediante un ánodo de sacrificio de cinc, de modo que un extremo de dicha cuerda se ha introducido directamente en el interior del electrolito conductor, mientras que el extremo opuesto de la misma, se ha mantenido unido sólidamente a una chapa de zinc sumergida parcialmente en la solución de nitrato potásico, sin

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

embargo, este extremo de la cuerda ha permanecido seco y separado de la disolución en su punto de unión con el ánodo de zinc.

La utilización de un electrodo de referencia de Ag/AgCl (3M) en contacto con el electrolito conductor permitió realizar diversas medidas eléctricas de control, se determinó la diferencia de potencial entre la disolución de nitrato potásico y el ánodo de cinc y también entre el electrolito conductor y la cuerda (cátodo). El control de la diferencia de potencial entre la cuerda y el ánodo de cinc informó puntualmente de la eficacia del ánodo de sacrificio.

En el caso de su cuerda homóloga, la protección se ha efectuado mediante corriente impresa, bajo las condiciones de trabajo de 6 voltios y 20mA, de diferencia de potencial y corriente nominal respectivamente, ambos suministrados por una fuente de c.c.

Las cuerdas de referencia se han sometido a idéntico ataque corrosivo, pero sin protección alguna, se ha hecho así con objeto de establecer una referencia con la que validar la eficacia de los procesos de protección catódica contra la corrosión.

Las cuerdas han sido sometidas al efecto de 96h de corrosión, durante cuatro ciclos sucesivos de 24 horas de ataque corrosivo y posterior análisis de resultados.

En el proceso experimental las cuerdas ensayadas se han sometido a un esfuerzo de tracción permanente y constante que las ha mantenido afinadas a la frecuencia fundamental de 147 Hz con el fin de conseguir un montaje experimental reproducible y fiel a las condiciones habituales de uso de la guitarra.

El esfuerzo de tracción que soportan las cuerdas en estas condiciones de trabajo, provoca una sutil separación entre las vueltas del arrollamiento, de forma que entre dos vueltas consecutivas queda abierto el paso de la disolución corrosiva hacia el núcleo, y como consecuencia, se produce directamente el ataque corrosivo del mismo.

En las cuerdas comercializadas con una microcubierta de teflón que impide la corrosión, la película protectora superficial anticorrosión acaba por agrietarse,

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

rompiéndose como consecuencia del fenómeno descrito, así como por el efecto continuado de la fricción con los dedos del músico, de ahí lo limitado de este medio de protección contra la corrosión.

Durante el proceso experimental, las cuerdas se han sometido a una tensión media de 89 N en el banco de pruebas. Durante ciclos sucesivos y acumulativos de 24 horas, las cuerdas han sufrido el efecto corrosivo de la disolución de sudor.

Avanzado el proceso, se ha podido observar el efecto destructivo de la corrosión en aquellas zonas concretas de las cuerdas en las que las sollicitaciones mecánicas eran mayores: puntos de apoyo de las cuerdas sobre el puente, puntos de sujeción sobre la cejuela superior, zonas de arrollamiento sobre las clavijas.

Además, ha sido un hecho constatable que, en estos puntos, las cuerdas han sufrido sobreesfuerzos de tracción y de cortadura considerablemente superiores a los que ha soportado el resto de la superficie de las mismas, pues como consecuencia, las cuerdas se han fracturado en dichas localizaciones durante el proceso de corrosión, impidiendo finalizar, en reiteradas ocasiones la toma de datos planificada.

En muchas de estas posiciones concretas de las cuerdas, se han producido deformaciones elásticas, incluso deformaciones plásticas. Desde un punto de vista electroquímico, estas zonas se comportan anódicamente respecto de aquellas sometidas a menor tensión o libres de ella, así pues, en ellas, el ataque corrosivo es más intenso, haciendo proliferar depósitos de corrosión. Para evitar la rotura de las cuerdas y así llevar a cabo el ciclo completo de medidas experimentales, se han realizado algunas modificaciones en el diseño de algunos de estos puntos críticos del banco de pruebas.

Así finalmente, se ha completado el proceso de toma de datos electroquímicos y acústicos en 4 ciclos de 24 horas bajo corrosión (96 horas en total), como paso previo, las cuerdas se han ido extrayendo simultáneamente del banco de pruebas, lavándose con agua ultrapura y secándose cuidadosamente para no alterar la morfología superficial de las mismas, también se han obtenido microfotografías que han proporcionado una ilustración visual del proceso.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Posteriormente, en cada ciclo se ha obtenido la medida de la Resistencia de Polarización ( $R_p$ ) y de la Espectroscopía de Impedancia electroquímica (E.I.S) para medir la velocidad de corrosión instantánea y el grado de corrosión de las cuerdas respectivamente.

Una vez finalizado el ciclo completo de medidas, se ha realizado el test de Tafel, cuyos resultados han sido contrastados con los correspondientes al análisis de una cuerda nueva.

Después de haber finalizado el período de ataque previsto en cada una de las experiencias, se ha procedido a una limpieza mecánica cuidadosa de las cuerdas con el fin de eliminar los productos de la oxidación, utilizando además como decapante una disolución 1 g/l de hexametilentetramina en ácido clorhídrico 1 M, con el fin de disolver los óxidos de Fe producidos durante el ataque. A continuación, las cuerdas se han sometido a un baño con acetona en ultrasonidos para posteriormente secarse y pesarse, registrándose la diferencia de masa de hierro entre las cuerdas protegidas y la cuerda de referencia privada de protección.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

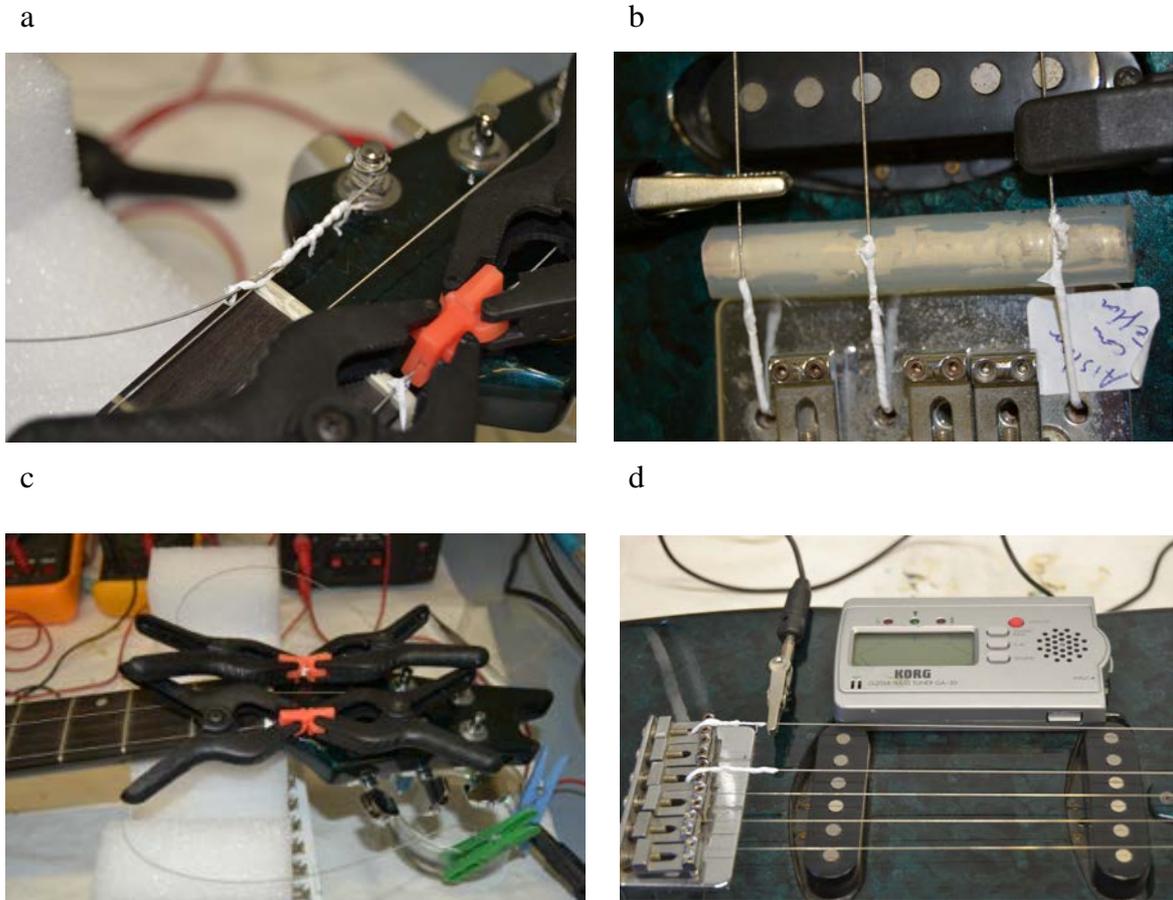


Fig. 13. Fotografías del montaje experimental en la fase de protección catódica: (a) el contacto de los extremos de la cuerda se asegura firmemente mediante pinzas. (b) se cierra el circuito de protección catódica con las cuerdas en sus extremos inferiores, la cuerda de referencia, en el centro, no se protegerá. (c) contactos eléctricos de las cuerdas asegurados, extremos introducidos en el electrolito conductor y protegidos catódicamente por la corriente impresa suministrada por las fuentes de alimentación. (d) afinación de cuerdas a 147 Hz.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

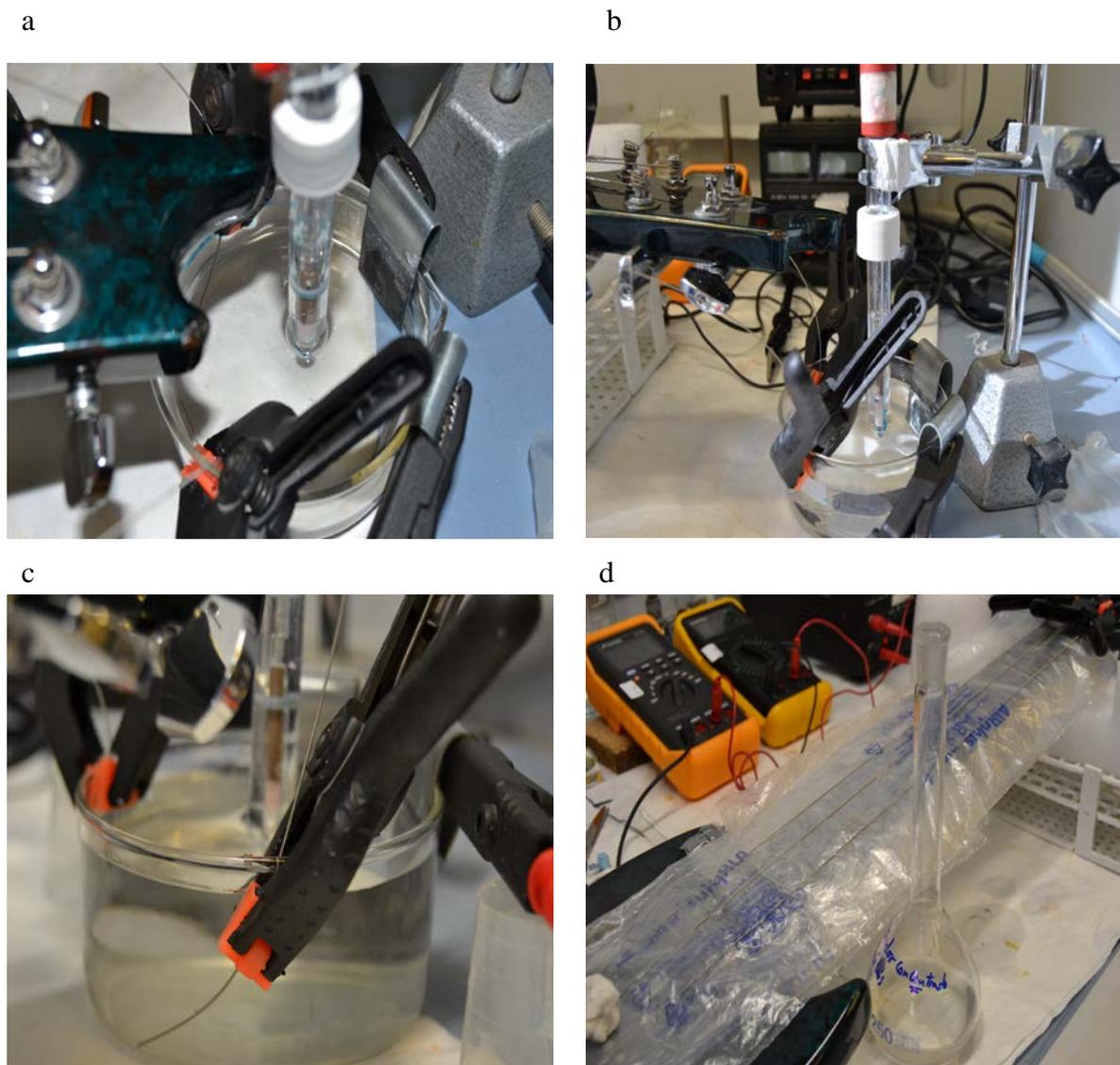


Fig. 14. Fotografías del montaje experimental en la fase de protección catódica: (a) ánodos de cinc y extremos de las cuerdas a proteger catódicamente parcialmente sumergidos en la disolución de nitrato potásico. (b) el electrodo de referencia de Ag/AgCl (3M) en contacto con el electrolito conductor permite realizar diversas medidas eléctricas del control de la eficacia de la protección catódica del ánodo de sacrificio. (c) extremo de las cuerdas (cátodos) sumergidos en el electrolito conductor. (d) cada cuerda ha sido impregnada homogéneamente en toda su extensión mediante un algodón empapado en sudor humano sintético.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

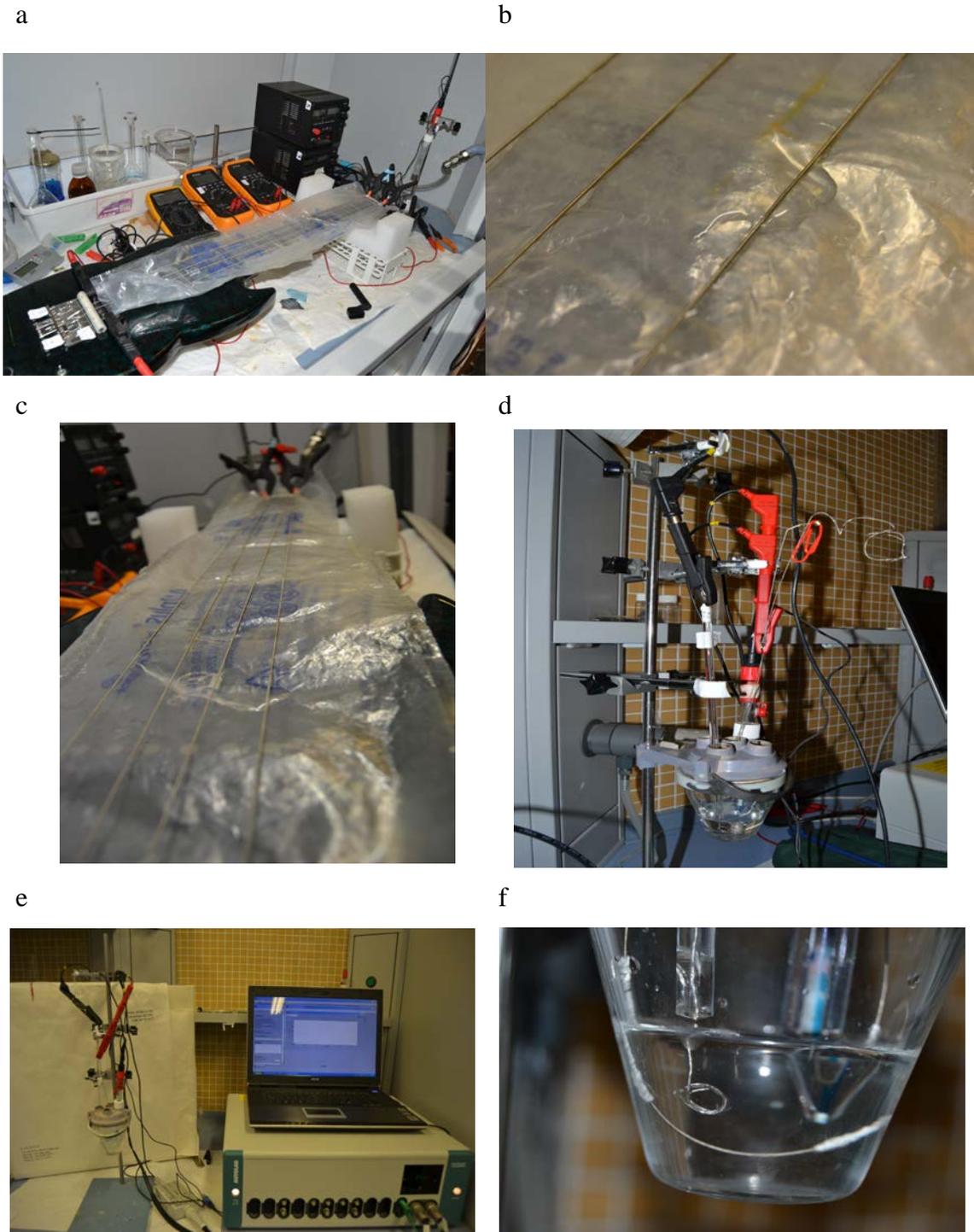


Fig. 14. Fotografías del ataque corrosivo y de la adquisición de datos: (a) proceso experimental en marcha. (b) muestras visibles de herrumbre. (c) vista longitudinal del dispositivo. (d) configuración de la celda troncocónica durante la adquisición de datos. (e) vista general con potenciostato. (f) detalle de celda con electrodo de trabajo (cuerda), contraelectrodo de platino y electrodo de referencia de Ag/AgCl (3M) en contacto con el electrolito conductor.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **3.3 Procedimiento experimental acústico**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 3.3 Procedimiento experimental acústico

Una vez realizadas las medidas electroquímicas y con objeto de caracterizar el comportamiento acústico de las cuerdas a lo largo del ataque corrosivo, se registraron las ondas de presión acústica correspondientes a la vibración de las cuerdas. Las señales acústicas se grabaron en una cámara semianecoica. Las figuras 16, 17 y 18 muestran gráficamente los aspectos descritos en este apartado.

Se diseñó un prototipo [31-33] de diapasón de guitarra adaptado a los requerimientos específicos del montaje experimental.

Colocada en el soporte de ensayos acústicos, las cuerdas permanecieron sujetas a ambos extremos del mismo, manteniéndose una distancia constante de 647.7 mm entre los dos puntos de sujeción.

Se incorporó al sistema una célula de carga (Load Cell) con objeto de medir las variaciones del esfuerzo por tracción mecánica que soportan las cuerdas a lo largo del proceso de corrosión. Durante el proceso experimental, las cuerdas fueron sometidas a una tensión de 89 N y de esta forma permanecieron afinadas en el primer modo de vibración a 147 Hz. Cada onda de presión acústica se obtuvo excitando cada cuerda en el mismo punto situado a 92 mm del puente (punto de sujeción inferior) evitándose así que las cuerdas fueran percutidas en algún nodo correspondiente a los 6 primeros modos de vibración.

Las medidas de presión sonora se grabaron en un recinto semianecoico [34-35], utilizando un micro omnidireccional G.R.A.S. 40 AF de campo abierto. Las señales fueron amplificadas y grabadas a través de una tarjeta de sonido National instruments USB 9234. Para la adquisición y el análisis de las señales se desarrollaron funciones en Matlab.

Las medidas de presión acústica se procesaron para determinar su contenido en frecuencias mediante la FFT (transformada rápida de Fourier), de esta forma, se estudiaron los cambios en el contenido armónico del sonido de las cuerdas. En los sucesivos estadios del ataque corrosivo se tomó nota de la amplitud de cada una de las frecuencias presentes. Puesto que la FFT no proporciona información de la variable temporal, se emplearon los

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

espectrogramas para determinar el comportamiento de cada una de las frecuencias en función del tiempo transcurrido.

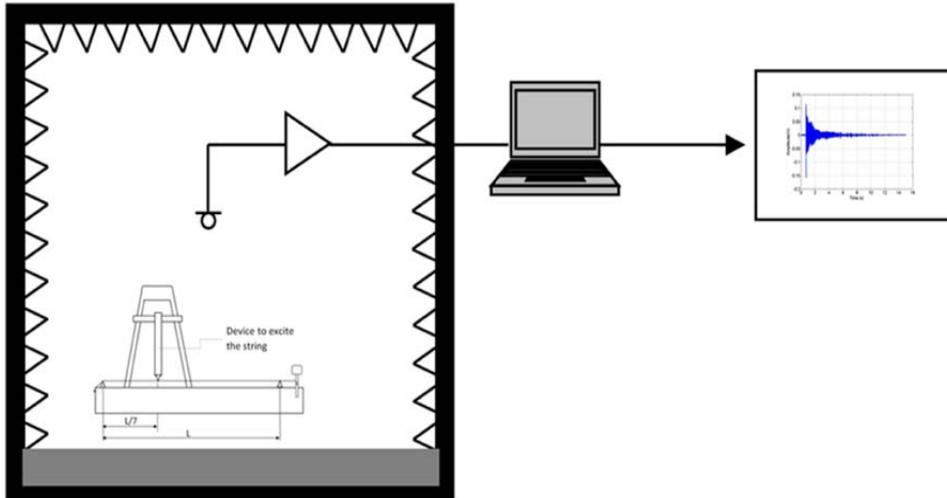


Fig. 16. Esquema general

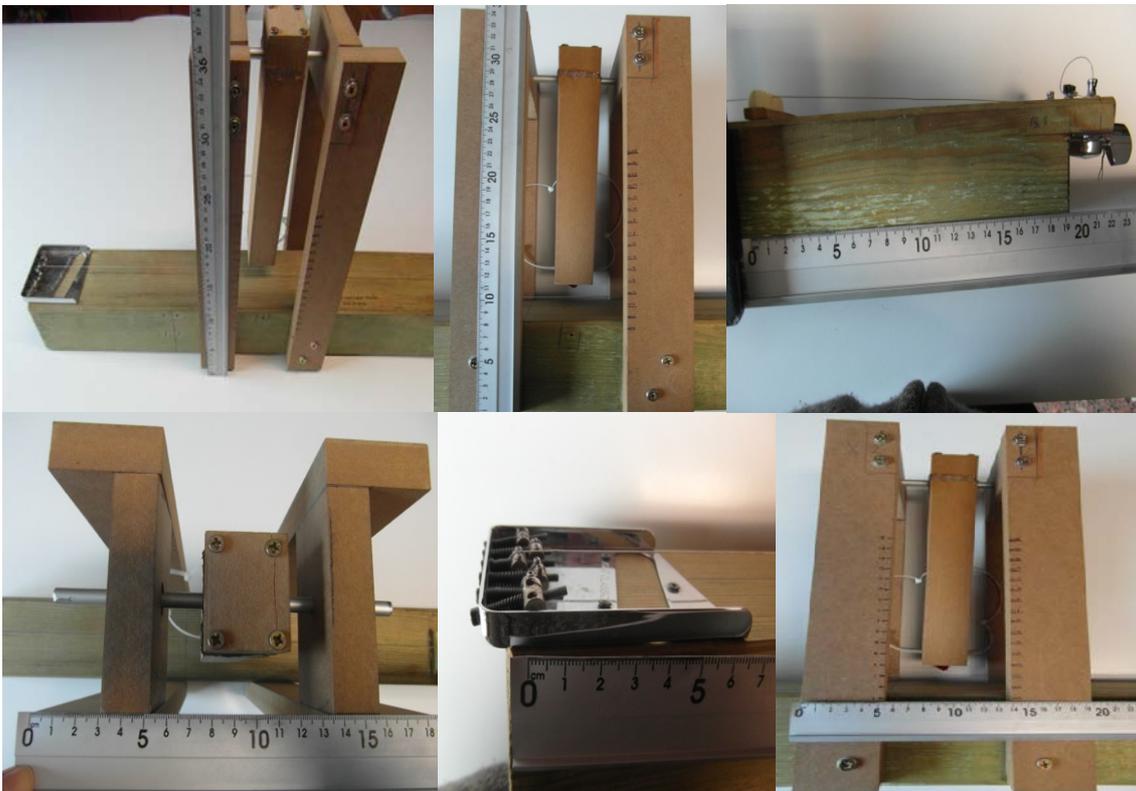


Fig. 17. Detalles constructivos y dimensiones correspondientes al prototipo para captura de señales acústicas.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

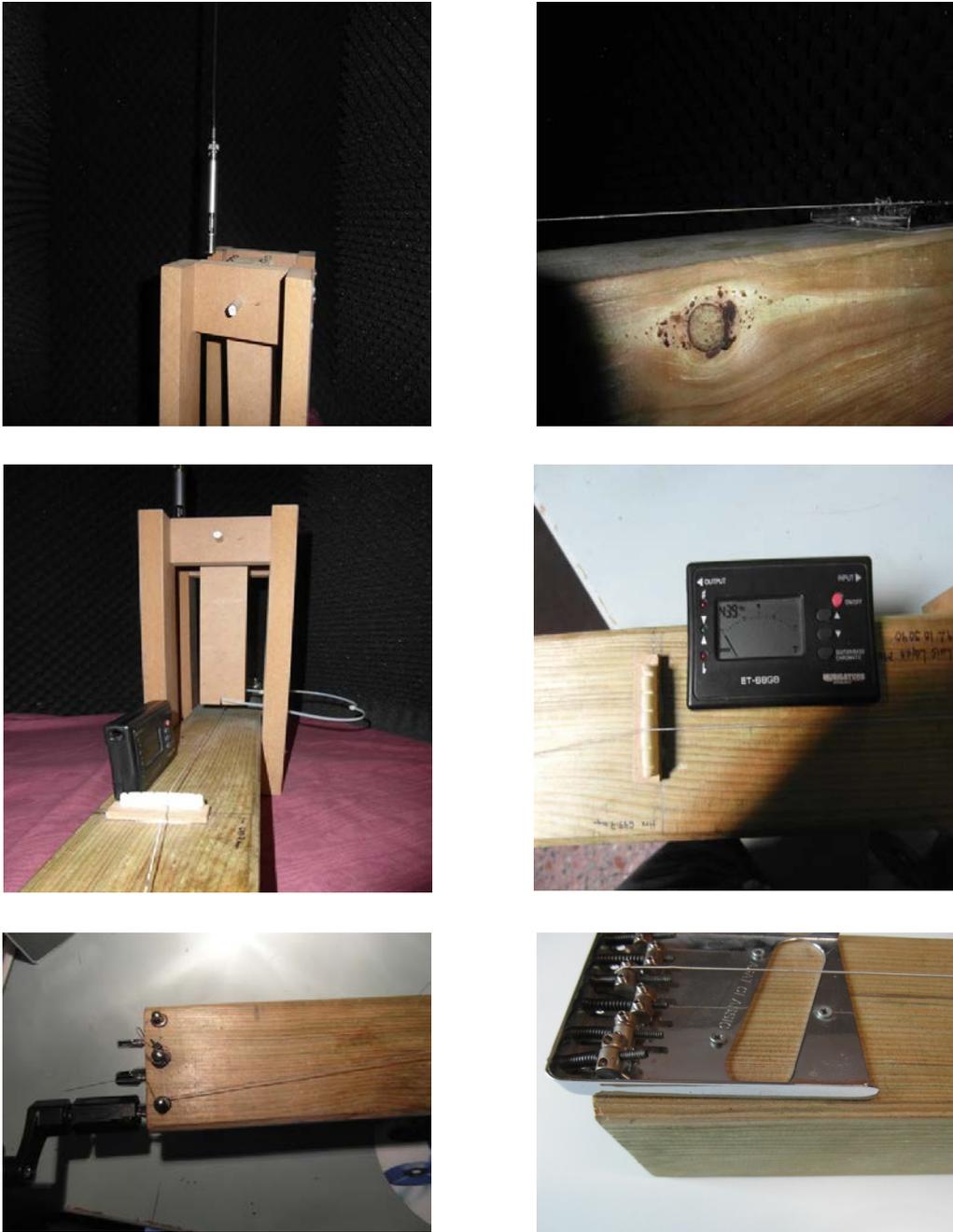


Fig. 18. Detalles del prototipo de diapasón de guitarra en el interior de la cámara semianecoica, preparación previa para la captura de señales acústicas

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Capítulo 4. Resultados y discusión**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **4.1. Resultados y discusión de la caracterización vibro-acústica de las cuerdas en función de su estado de corrosión**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 4.1. Resultados y discusión de la caracterización vibro-acústica de las cuerdas en función de su estado de corrosión

#### a) Análisis electroquímico

La figura 19 presenta el gráfico correspondiente a las medidas sin disolución de la resistividad eléctrica obtenidas al final de cada una de las etapas experimentales para 0, 3, 7, 14 y 17 días en el interior de la disolución de sudor sintético.

El procedimiento experimental se llevó a cabo con tres cuerdas de idénticas características. Los datos muestran como la resistividad eléctrica va aumentando a lo largo del ataque corrosivo.

Se están formando óxidos superficiales que provocan la disminución de la conductividad de la cuerda. Esta masa de óxidos al desprenderse parcialmente de las cuerdas provoca que su área disminuya. Este aspecto puede apreciarse en el capítulo 4 apartados 1 b) y 1 e), en el que se muestran las microfotografías obtenidas mediante FESEM.

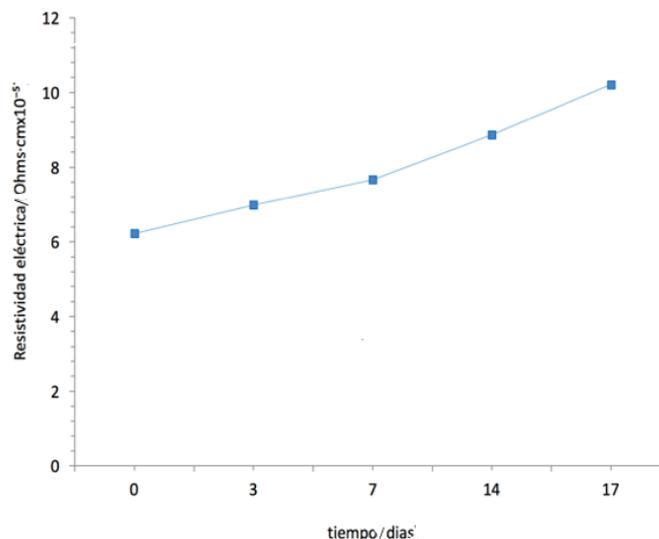


Fig. 19. Gráfico con los resultados de la resistividad eléctrica en función del tiempo de exposición y tabla asociada para el análisis longitudinal en seco de una cuerda D4 NW026. Longitud de la cuerda: 70 cm, sección transversal: 0.003 cm<sup>2</sup>

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

La figura 20 presenta las medidas de  $R_p$  de las cuerdas sumergidas en sudor humano sintético y como ya se citó con anterioridad, la concentración del electrolito se diluyó a 1/10 para preservar la obtención de suficiente información experimental ante la eventual rotura de las cuerdas.

Los valores de  $R_p$  ponen de manifiesto que la corrosión se inicia con mucha intensidad y que gradualmente va tomando valores cada vez menores hasta que finalmente, a partir del tercer día de exposición en la disolución de sudor, el ataque corrosivo se estabiliza entorno a un valor constante.

Una vez finalizado el ciclo completo de medidas de  $R_p$ , se realizó el ensayo destructivo Tafel para las cuerdas en la disolución de sudor.

Para iniciar el test de Tafel, [13-16, 18] las cuerdas se polarizaron a  $\pm 250\text{mV}$  a partir del potencial obtenido a circuito abierto. Así mismo se aplicó una frecuencia de velocidad de barrido de  $1\text{mV/s}$ , teniendo en cuenta que el área geométrica de la cuerda ensayada fue de  $0.622\text{cm}^2$ .

La información obtenida fue la siguiente:

$i_{\text{corr}} = 42.9 \mu\text{A/cm}^2$ , pendiente catódica  $b_c = 156\text{mV/dec}$ , pendiente anódica  $b_a = 403\text{mV/dec}$ ,  $E_{\text{corr}} = -395\text{mV}$ .

Los valores de  $b_c$  y de  $b_a$  se aplicaron en la ecuación de Stern Geary  $B = (b_c \times b_a) / (2.3(b_c + b_a))$  que proporcionó un valor de  $B = 48.9\text{mV}$ .

Los datos obtenidos son consistentes, pues pertenecen al rango de valores característicos de los aceros al níquel. A demás, es necesario destacar la tendencia a la pasivación que se observa en los resultados con un valor del parámetro  $b_a$  bastante superior a  $b_c$ . [36].

Finalmente, la  $R_p$  se calculó mediante la expresión:  $R_p = B / i_{\text{corr}} = 1140 \Omega \text{ cm}^2$ . Esta cifra es coherente con los valores (figura 19) obtenidos utilizando la técnica de la resistencia de polarización.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

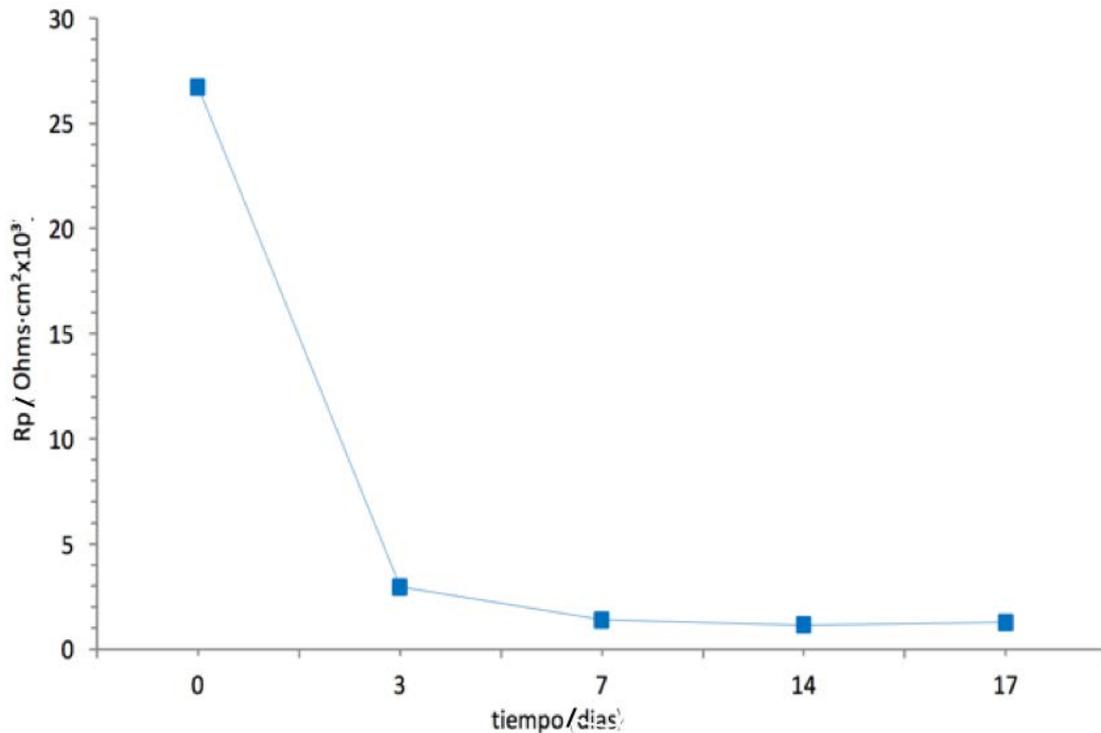


Fig. 20. Gráfico de la resistencia de polarización  $R_p$  en función del tiempo de exposición para una cuerda D4 NW026 sumergida en la disolución de sudor sintético.

Con objeto de caracterizar el comportamiento eléctrico de las cuerdas (medidas sin disolución) mediante EIS, se propuso el circuito eléctrico que se muestra en la figura 21.

Como ya se mencionó previamente, la estructura de las cuerdas consiste en dos cables de acero, el primero que constituye el núcleo central con sección transversal hexagonal y con microcubierta de estaño y el segundo, de acero al carbono con microcubierta de níquel, que permanece arrollado al núcleo.

Así es posible identificar la estructura de las cuerdas de guitarra mediante el circuito equivalente de la figura 21 [37], en la misma,  $R_a$  se corresponde con la resistencia del alma de acero,  $R_{ind}$  con la resistencia del arrollamiento y  $L$  con la inductancia asociada al mismo.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

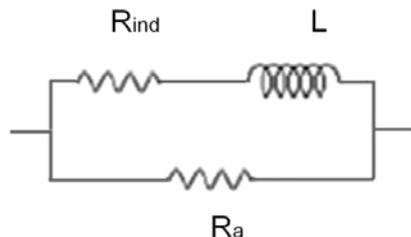


Fig. 21. Circuito equivalente correspondiente al análisis longitudinal y sin disolución de las cuerdas D4 NW026.

Las figuras 22 y 23 presentan los diagramas de Nyquist y Bode para el análisis longitudinal sin disolución antes de haberse introducido la cuerda en la disolución de sudor humano sintético.

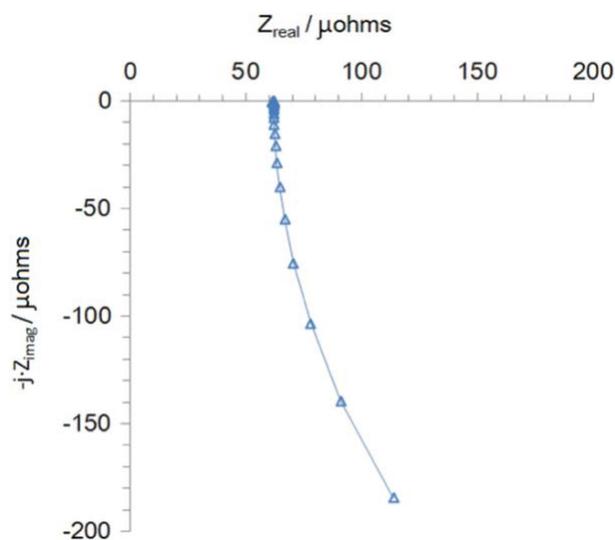


Fig. 22. Diagrama de Nyquist correspondiente al análisis longitudinal y sin disolución de una cuerda D4 NW026. El gráfico presenta los valores iniciales previa inmersión de las cuerdas en la disolución de sudor sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1 \text{ cm}^2$ , longitud:  $1 \text{ cm}$

Los datos experimentales dejan constancia de un claro comportamiento inductivo. No resulta extraño que la geometría característica de las cuerdas hiciera esperar este resultado.

El diagrama de Nyquist muestra como la reactancia inductiva decrece a medida que la frecuencia alcanza valores cada vez menores. Así pues, los datos expuestos en la figura 23, que presentan los valores de fase en función

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

de la frecuencia, revelan un comportamiento que gradualmente se va tornando más resistivo a medida que se alcanzan frecuencias cada vez más cercanas a cero.

Así mismo el diagrama de Bode revela que el módulo de la impedancia va disminuyendo gradualmente con la caída de la frecuencia. Por debajo de 1000 Hz el módulo de la impedancia se estabiliza con un valor resistivo puro de  $6.2 \cdot 10^{-5} \Omega$ .

Con objeto de reproducir las condiciones en las que la sudoración del músico afectaría a las cuerdas de la guitarra, éstas fueron sumergidas en disoluciones de sudor humano sintético. Las medidas de EIS fueron realizadas al final del día 3, 7, 14 y 17.

La tabla 2 presenta los valores obtenidos en el análisis longitudinal (medidas sin disolución) después de haber ajustado la información obtenida experimentalmente al circuito eléctrico equivalente de la figura 21.

Estos datos están referidos a  $1\text{cm}^2$  de sección transversal y a 1cm de la longitud de las cuerdas.

Las medidas fueron obtenidas tras finalizar cada uno de los estadios planificados del ataque corrosivo con las cuerdas sumergidas en la disolución de sudor humano sintético, como ya se ha indicado.

Las medidas iniciales fueron extraídas a partir de cuerdas nuevas, sin haber sido tratadas previamente con la disolución de sudor sintético.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

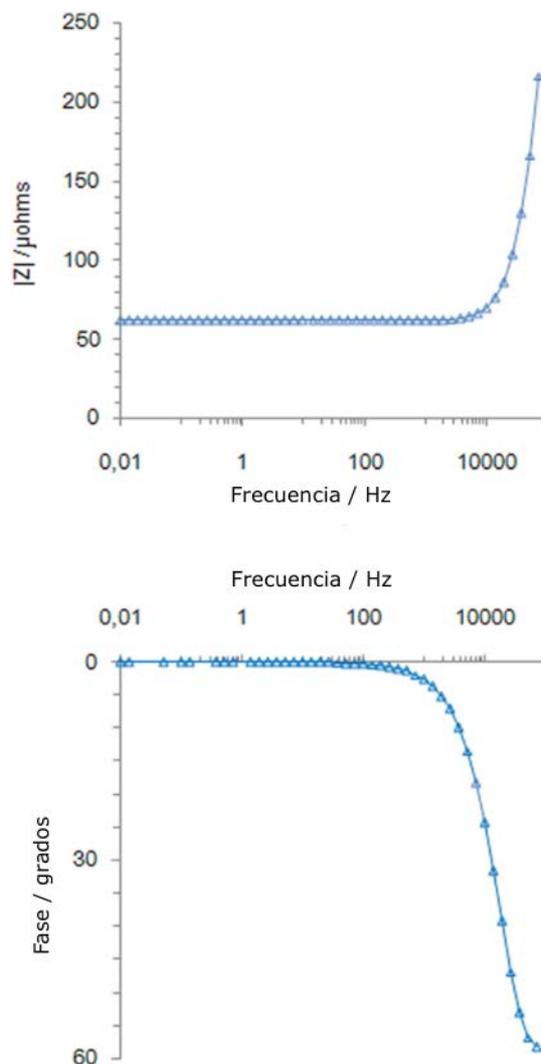


Fig. 23. Diagrama de Bode obtenido a partir del análisis longitudinal sin disolución de una cuerda D4 NW026 D'Addario. El gráfico representa los valores iniciales previos a la inmersión de las cuerdas en la disolución de sudor humano sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1 \text{ cm}^2$ , longitud: 1 cm.

Como se pone de manifiesto la figura 24, el valor de la resistencia asociada al alma de acero ( $R_a$ ) aumenta sensiblemente. Ésto es debido al proceso de corrosión que el núcleo de acero está sufriendo. De forma similar el valor de la resistencia ( $R_{ind}$ ) asociada a la inductancia del arrollamiento tiende también a incrementarse, aunque de forma no tan apreciable, ya que este cable no revela haber sufrido un ataque corrosivo tan severo.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

La figura 25 en consonancia con los resultados obtenidos para la resistencia asociada al alma de acero ( $R_a$ ), presenta una microfotografía tomada mediante FESEM de la sección transversal de una cuerda, se aprecia una vuelta del arrollamiento de acero al carbono sobre el núcleo de sección hexagonal, la imagen evidencia la intensidad del proceso corrosivo que está sufriendo el núcleo de la cuerda, en la misma se manifiesta de forma notable el depósito de óxido sobre el mismo.

t / días de ataque corrosivo	cuerdas nuevas	3 días	7 días	14 días	17 días
$R_a$ ( $\Omega$ )	$6.75 \times 10^{-5}$	$7.70 \times 10^{-5}$	$8.49 \times 10^{-5}$	$10.0 \times 10^{-5}$	$11.68 \times 10^{-5}$
L (Henrios)	$5.34 \times 10^{-10}$	$5.19 \times 10^{-10}$	$5.41 \times 10^{-10}$	$5.46 \times 10^{-10}$	$5.52 \times 10^{-10}$
$R_{ind}$ ( $\Omega$ )	$7.56 \times 10^{-4}$	$7.52 \times 10^{-4}$	$7.98 \times 10^{-4}$	$7.91 \times 10^{-4}$	$8.24 \times 10^{-4}$

Tabla 2. Valores obtenidos para los parámetros del circuito equivalente de la figura 20 correspondientes al análisis longitudinal en sin disolución de EIS.

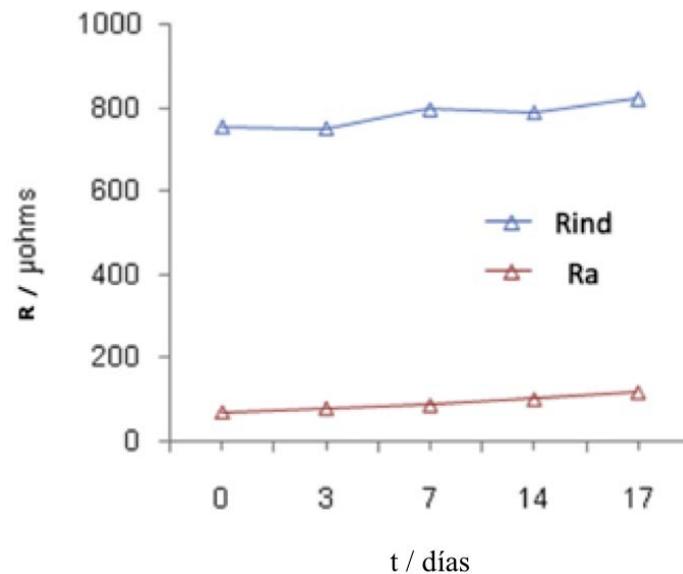


Fig. 24. Representación gráfica de  $R_a$  y de  $R_{ind}$  obtenida a partir del análisis longitudinal y sin disolución mediante EIS para una cuerda D4 NW026 D`Addario. Sección transversal de la cuerda:  $1 \text{ cm}^2$ , longitud: 1cm.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Como puede apreciarse en la tabla 2, los datos relativos a la inductancia presentan un leve incremento, probablemente debido a cambios en la geometría y en la composición química del arrollamiento de acero.

Al finalizar el ciclo completo de medidas, la morfología del electrodo presentó numerosos defectos, micro porosidades e irregularidades como resultado de la acción corrosiva.

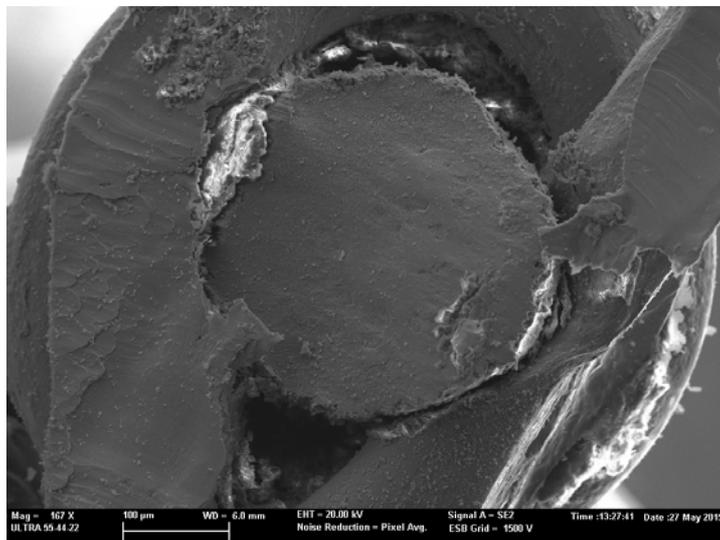


Fig. 25. Microfotografía de una cuerda D4 NW026 a lo largo del proceso corrosivo en presencia de la disolución de sudor humano sintético obtenida mediante FESEM.

La figura 26 muestra el diagrama de Nyquist elaborado a partir de las cuerdas inmersas en la disolución de sudor humano sintético. El achatamiento de los semicírculos es característico del notable deterioro que han sufrido las cuerdas por efecto de la corrosión.

Los resultados obtenidos han determinado la necesidad de aplicar un circuito equivalente que se adaptara a todas las irregularidades morfológicas derivadas de las condiciones experimentales.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

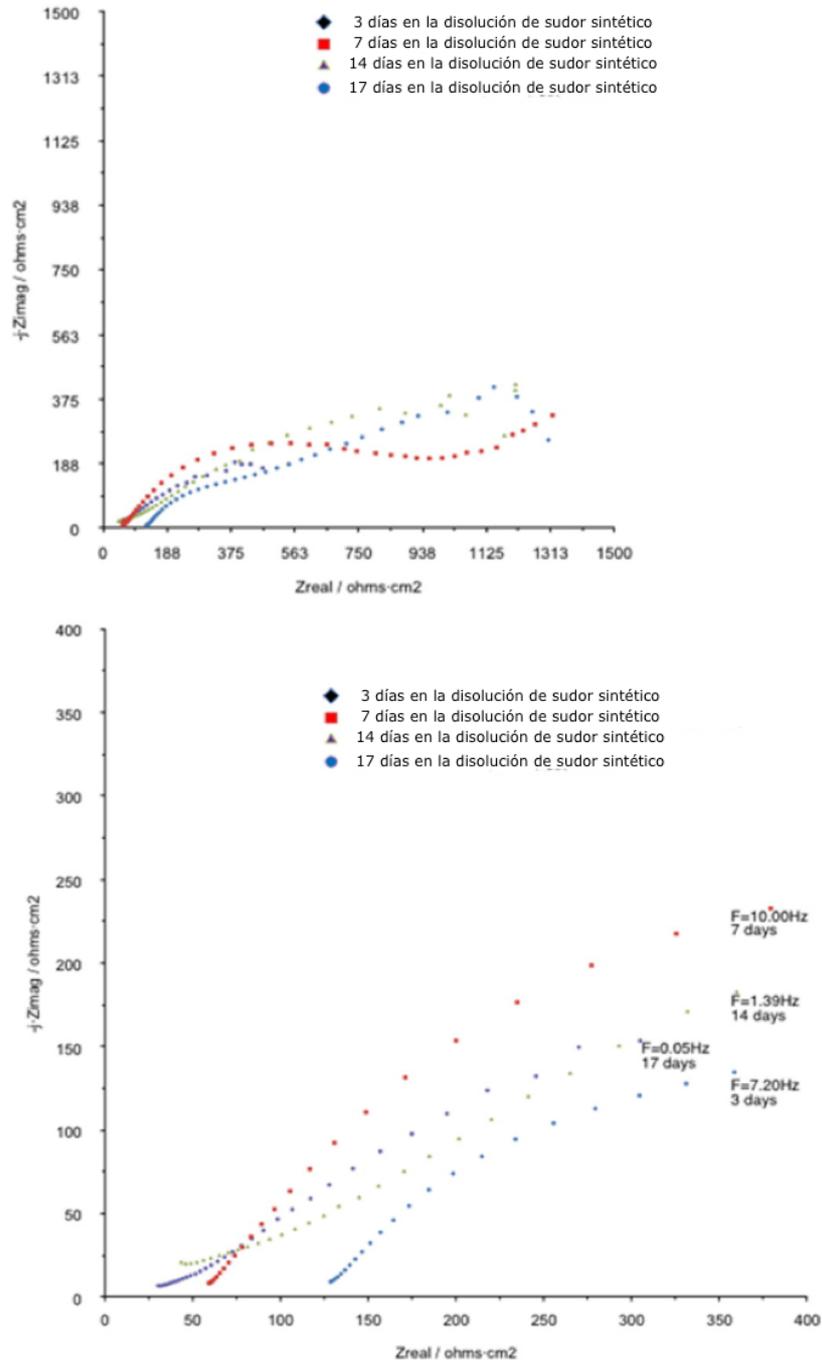


Fig. 26. Diagrama de Nyquist con una imagen ampliada del análisis EIS de una cuerda D4 NW026. El análisis experimental de las cuerdas se ha realizado en el interior de la disolución de sudor humano sintético a lo largo de 3, 7, 14 y 17 días de ataque corrosivo. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{cm}^2$ , longitud: 1 cm.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En el circuito se han introducido elementos de fase constante (CPEs) para simular el comportamiento capacitivo de los condensadores y el comportamiento difusional de las especies iónicas electro-activas. Los CPEs se aplican cuando los materiales estudiados manifiestan un comportamiento no ideal, revelando anomalías y porosidad irregular.

La impedancia de los CPEs se define como  $Z_{CPE} = A^{-1} (j\omega)^{-\alpha}$ , donde  $\alpha$  es un exponente fraccionario, tomando valores entre 0 y 1;  $\omega = 2 \pi f$  es la frecuencia angular y A es un parámetro independiente de la frecuencia. Para  $\alpha = 0$ , el CPE manifiesta un carácter resistivo puro, para  $\alpha = 1$ , se comporta como un condensador ideal ( $A = C$ ) y para  $\alpha = 0.5$ , el CPE representa una difusión semi-infinita [9,10].

Así pues, para las cuerdas sometidas a la disolución de sudor artificial pueden esperarse las siguientes contribuciones:

- $R_e$ : Resistencia del electrolito.
- $R_g$ : Resistencia electrónica de la cuerda de guitarra D4 NW026.
- $CPE_g$ : Condensador no ideal en paralelo asociado con  $R_g$  para tener en cuenta las propiedades dieléctricas de las cuerdas de guitarra. Este condensador no-ideal podría despreciarse, puesto que físicamente, una cuerda metálica de guitarra debería actuar más como una resistencia que como un material dieléctrico. Los valores de  $R_g$  ( $\ll 1$ , resistividad  $6.2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ) son despreciables en comparación con los de  $R_e$ , ya que las cuerdas de guitarra son de material metálico.
- L: Inductancia referida al cable enrollado sobre el núcleo de la cuerda.
- $R_{tc}$  : Resistencia relativa a la transferencia de carga (ion-electrón) de la interfase entre la cuerda de guitarra y la disolución de sudor artificial en presencia de especies electro-activas.
- $R_d$  : Resistencia de la difusión lineal semi-infinita.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

- $CPE_d-T$ : Condensador no-ideal correspondiente a la difusión lineal semi-infinita.
- $CPE_d-P$ : el coeficiente en una difusión semi-infinita se aproxima a  $\alpha = 0.5$  [9,10].

Por otra parte, no se aprecia comportamiento inductivo en el diagrama de Nyquist figura 26 Por lo tanto, la inductancia no se ha tenido en cuenta para el circuito eléctrico equivalente.

En la figura 27 se presenta el circuito equivalente propuesto para el proceso de corrosión. La tabla 3 presenta los datos tras haber sido ajustados a los obtenidos experimentalmente con el circuito equivalente propuesto. Los valores de  $CPE_d-P$  próximos a 0.5 corroboraron que se estaba midiendo un proceso de difusión.  $R_{tc}$  y  $R_d$  proporcionaron los valores más altos de toda la respuesta eléctrica.

Entre los dos parámetros, el de mayor magnitud durante el proceso experimental fue  $R_d$  (resistencia relacionada con la difusión). De lo que se infiere que la difusión fue el factor limitante de la velocidad del proceso corrosivo. Por otra parte, al evaluar en la tabla 3 la  $R_{tc}$  (resistencia relativa a la transferencia de carga en la interfase cuerda de guitarra / solución de sudor) se evidencia su tendencia a disminuir. En estadios avanzados del proceso experimental, el ataque corrosivo se hace más severo y la caída de  $R_{tc}$  da prueba de ello, así mismo el valor de  $CPE_{tc-P}$  también tiende a disminuir. El deterioro en la estructura morfológica del electrodo debido al proceso de corrosión es severo y se evidencia con la presencia generalizada de micro porosidades, irregularidades y anomalías.

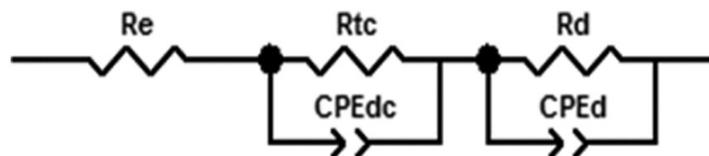


Fig. 27. Circuito eléctrico equivalente de una cuerda D4 NW026 sumergida en la disolución de sudor humano sintético para el análisis de EIS.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Tiempo / días	3 días de corrosión	7 días de corrosión	14 días de corrosión	17 días de corrosión
Re ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	121	52	17	26
Rtc ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	209	531	64	82
CPE tc -T ( $F^\alpha \cdot \Omega^{(1-\alpha)} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$13.5 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-5}$	$10.9 \times 10^{-5}$	$22.7 \times 10^{-5}$
CPE tc -P	0.69	0.73	0.49	0.38
Rd ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	2144	1156	1219	1566
CPEd -T ( $F^\alpha \cdot \Omega^{(1-\alpha)} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$9.0 \times 10^{-4}$	$8.9 \times 10^{-4}$	$6.3 \times 10^{-4}$	$16.5 \times 10^{-4}$
CPEd -P	0.43	0.41	0.43	0.49

---

Tabla 3. Valores obtenidos para los parámetros del circuito equivalente de la figura 27 correspondientes al análisis en disolución mediante EIS durante el ataque corrosivo.

### a) Medida de la pérdida de masa

La figura 28 representa los valores correspondientes a las medidas de masa de las cuerdas. Estos valores fueron obtenidos al final de cada una de las etapas planificadas de oxidación, así quedó cuantificada la pérdida de masa de las cuerdas provocada por la corrosión.

Se puede apreciar que las cuerdas sufrieron una leve pérdida de masa como resultado de la descomposición del metal. En consecuencia, el diámetro de las cuerdas disminuyó debido al proceso de corrosión.

Estos datos son coherentes con la figura 24 y la Tabla 2 donde la resistencia ( $R_a$ ) relativa al alma de acero ha aumentado, los valores de  $R_{ind}$  asociados a la inductancia del arrollamiento también tienden a aumentar. Cabe pues vincular el comportamiento ascendente de la resistencia a la disminución del diámetro de la sección transversal de las cuerdas y a la generación de óxidos provocado por el ataque corrosivo.

La información obtenida, mediante el análisis de energía dispersiva de rayos X (EDX) al finalizar el ciclo de 17 días de ataque corrosivo, pone de manifiesto una notable diferencia en la concentración de oxígeno presente en el alma de acero (31.33%) de la cuerda, frente a la cantidad del mismo presente en el arrollamiento (6.78%).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

Estos resultados revelan que la acción corrosiva en el núcleo, es mucho más intensa que en el arrollamiento. Y más aún, que esta significativa concentración de  $O_2$  se evidencia en forma de óxidos de hierro que permanecen adheridos a la superficie de las cuerdas, justificando que en las cuerdas no se haya producido una significativa pérdida de masa.

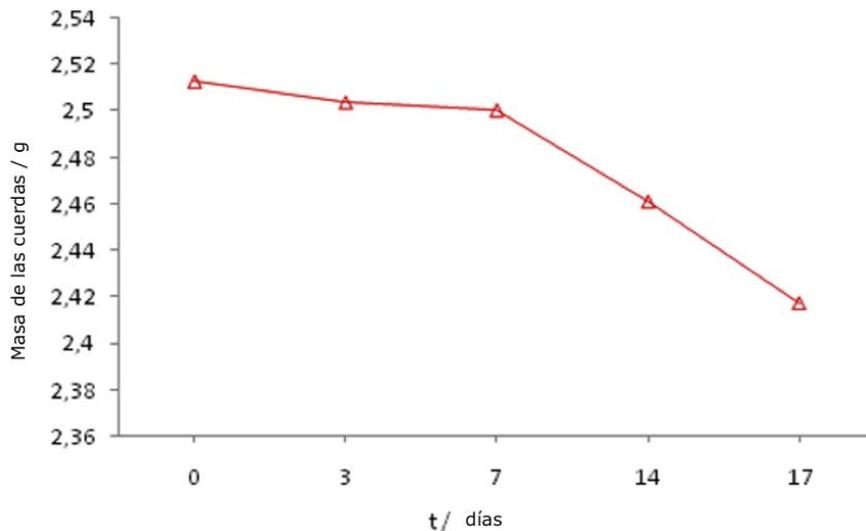


Fig. 28. Representación gráfica de la pérdida de masa de una cuerda D4 NW026 a lo largo de 17 días de proceso corrosivo en presencia de la disolución de sudor humano sintético.

### **b) Correlación entre la pérdida de masa de una cuerda y la tensión mecánica por tracción soportada para alcanzar en cada estadio de corrosión la frecuencia de afinación $f_0=147$ Hz.**

La pérdida de masa experimentada por las cuerdas en el proceso de corrosión, ha dado lugar a una continua modificación de las condiciones iniciales de afinación.

Así pues, tras cada experimental, la premisa de mantener la afinación en 147Hz como armónico fundamental, ha implicado la modificación de los valores de tensión registrados por la célula de carga conectada al diapason de pruebas, arrojando los valores que se muestran en la tabla adjunta y su correspondiente gráfico:

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

t / horas de corrosión	masa de la cuerda / g	tensión soportada / Newton
0	2,51	81,82
72	2,47	81,00
168	2,44	78,70
336	2,43	73,82

---

Tabla 4. Valores correspondientes a la correlación entre tensión y masa a 147 hercios.

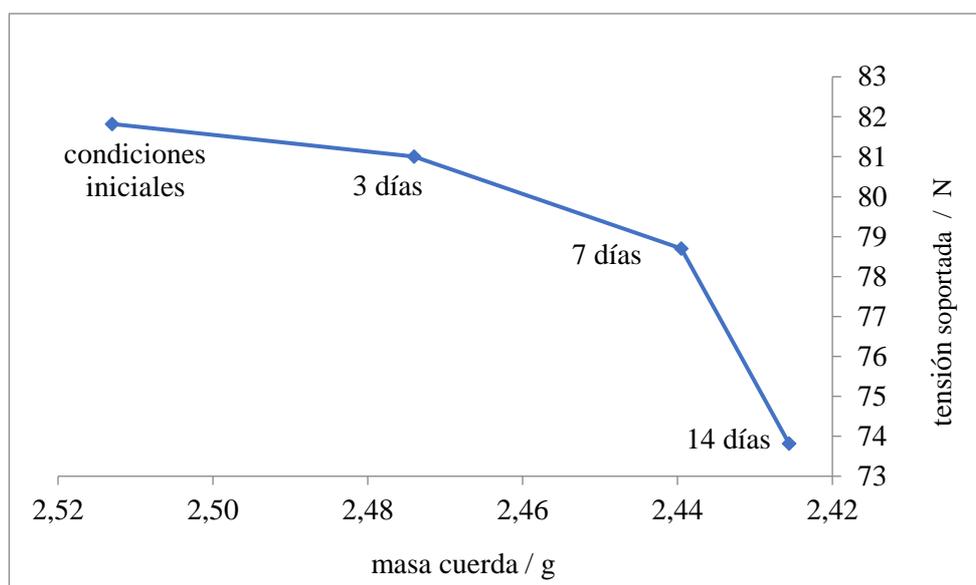


Fig. 29. correlación entre la tensión aplicada y la masa de una cuerda.

### c) Análisis de la morfología superficial mediante microscopio estereoscópico

Las siguientes microfotografías se realizaron mediante microscopio estereoscópico, al final de cada uno de los estadios de corrosión. En las imágenes se puede apreciar desde el estado de las cuerdas nuevas (figura 30), hasta la sección transversal de una rotura producida por el ataque corrosivo (figura 39), pasando por la característica distribución y depósito del

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

óxido con distinta intensidad sobre la superficie de una cuerda (figuras 31-34), así como zonas en que el arrollamiento ha sido totalmente eliminado dejando el núcleo hexagonal a la vista (figuras 35 y 36) e incluso fracturado (figuras 37 y 38).

Las siguientes microfotografías se realizaron mediante microscopio estereoscópico al final de cada uno de los experimentales.

El efecto de la disolución corrosiva concentrada de sudor humano sintético, tal y como se aprecia en la serie de imágenes, a los 14 días del ataque corrosivo provocó la rotura de algunas de las muestras.

El proceso experimental se puso nuevamente en marcha, pero a partir de un electrolito de sudor diluido a 1/10 de su concentración inicial, de este modo se completó el ciclo de 17 días de corrosión.

En el apartado siguiente se podrán observar las microfotografías del proceso experimental obtenidas mediante FESEM.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

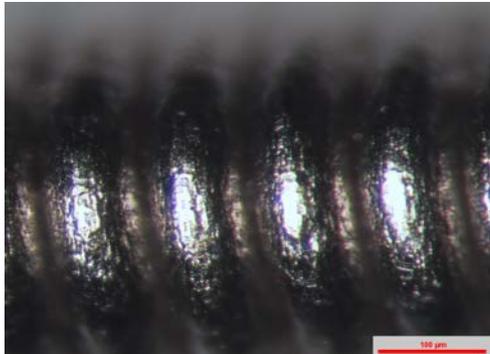


Fig. 30. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario nueva.



Fig. 31. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 72 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 32. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 168 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 33. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 336 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 34. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 336 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 35. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 336 h a disolución de sudor concentrado.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.



Fig. 36. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 408 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 37. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 408 h a disolución de sudor concentrado.



Fig. 38. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 408 h a disolución de sudor concentrado.

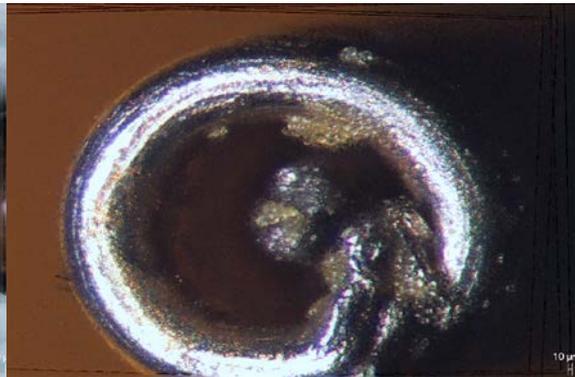


Fig. 39. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 408 h a disolución de sudor concentrado.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **d) Análisis de la morfología superficial mediante microscopio electrónico de emisión de campo (FESEM).**

En la figura 40, (a, c, e) las imágenes de la izquierda presentan una serie de microfotografías tomadas mediante FESEM a partir de una cuerda D4 NW026 nueva, así mismo, (b, d, f) las imágenes de la derecha fueron tomadas al cabo de 17 días tras haber sido completado el proceso experimental. Las imágenes muestran el efecto del ataque corrosivo producido por el sudor sintético diluido a una décima parte de su concentración inicial.

Las imágenes a y b muestran fragmentos longitudinales de cuerda, mientras que c y d son imágenes detalladas de las mismas.

Son notables las diferencias entre la cuerda nueva y el aspecto que presenta a los 17 días, en b y d destaca el característico depósito de óxidos ubicado en las cavidades situadas entre las vueltas del arrollamiento tras finalizar el ataque corrosivo. Al comparar las figuras 40f y 40d, es destacable que la corrosión sobre la superficie del arrollamiento es de menor intensidad que la que se ha producido en el alma de acero de la cuerda. La figura 40e ofrece una imagen del núcleo de la cuerda en su estado original que contrasta significativamente con la imagen 40f.

En las microfotografías, obtenidas mediante FESEM, de la derecha se aprecia como una importante cantidad de óxidos fluye desde el núcleo de la cuerda. En el interior de la cuerda (alma de acero envuelta por el arrollamiento) la concentración de oxígeno atmosférico es menor, como consecuencia, podría estar desarrollándose en este sistema un proceso de corrosión por aireación diferencial.

Por otra parte, la naturaleza de estas cuerdas de guitarra, constituye un medio en el que frente al acero destaca la presencia del estaño y del níquel, metales más nobles que el acero. Cabe plantear, además, la presencia de un proceso de corrosión galvánica. Del análisis EDX se deriva que la concentración de oxígeno en el núcleo de una cuerda es del 31.33%, esto pone de manifiesto que la presencia de estaño y níquel podría estar acelerando el ataque corrosivo en el núcleo.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

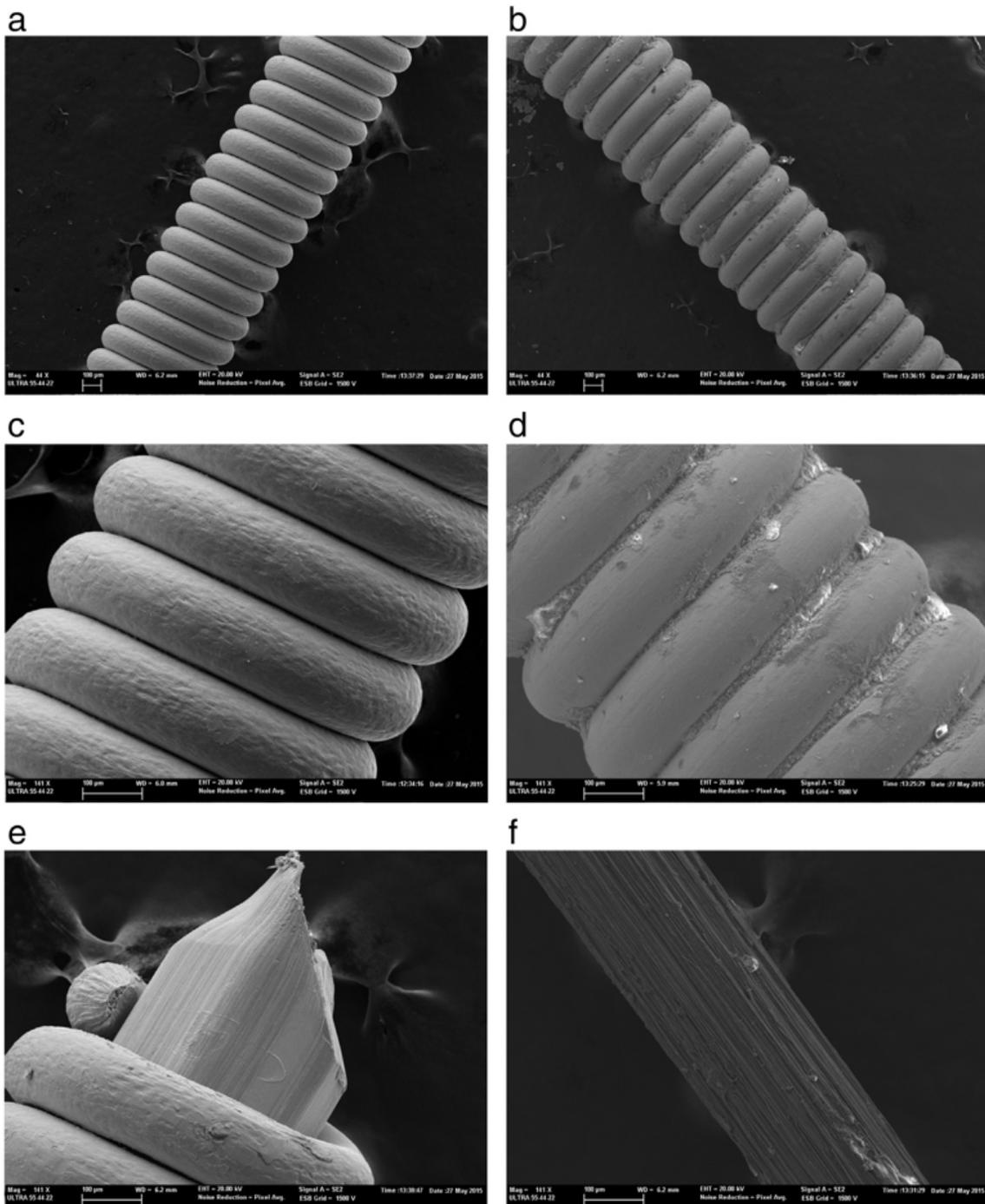


Fig. 40. Cuerda D4 NW026 a lo largo de 17 días de proceso corrosivo en presencia de la disolución de sudor humano sintético obtenidas mediante FESEM: (a, c, e) de una cuerda nueva, (b, d, f) después de 17 días.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### e) Análisis acústico

Durante cuatro etapas, que abarcaron: 3, 7, 14 y 17 días, las cuerdas se sometieron a un proceso de corrosión controlada. Al finalizar cada uno, se realizaron las correspondientes medidas para obtener información electroquímica.

La figura 41 presenta el gráfico amplitud-tiempo correspondiente a la señal de audio obtenida a partir de una cuerda nueva con antelación al proceso corrosivo. Es destacable el progresivo decaimiento de la señal a medida que avanza la actividad corrosiva.

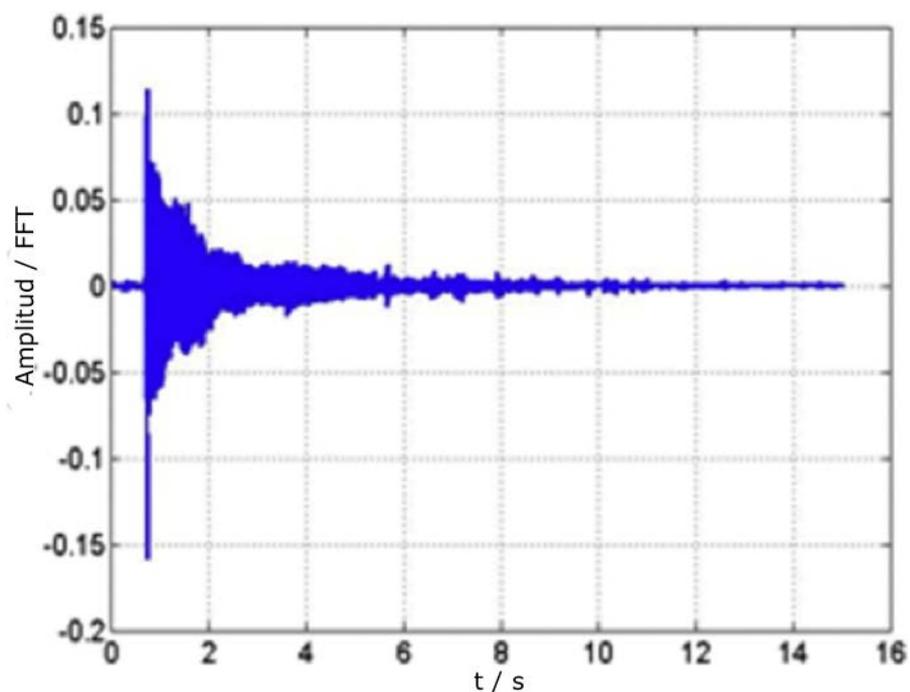


Fig. 41. Gráfico amplitud-tiempo para una cuerda D4 NW026 nueva.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

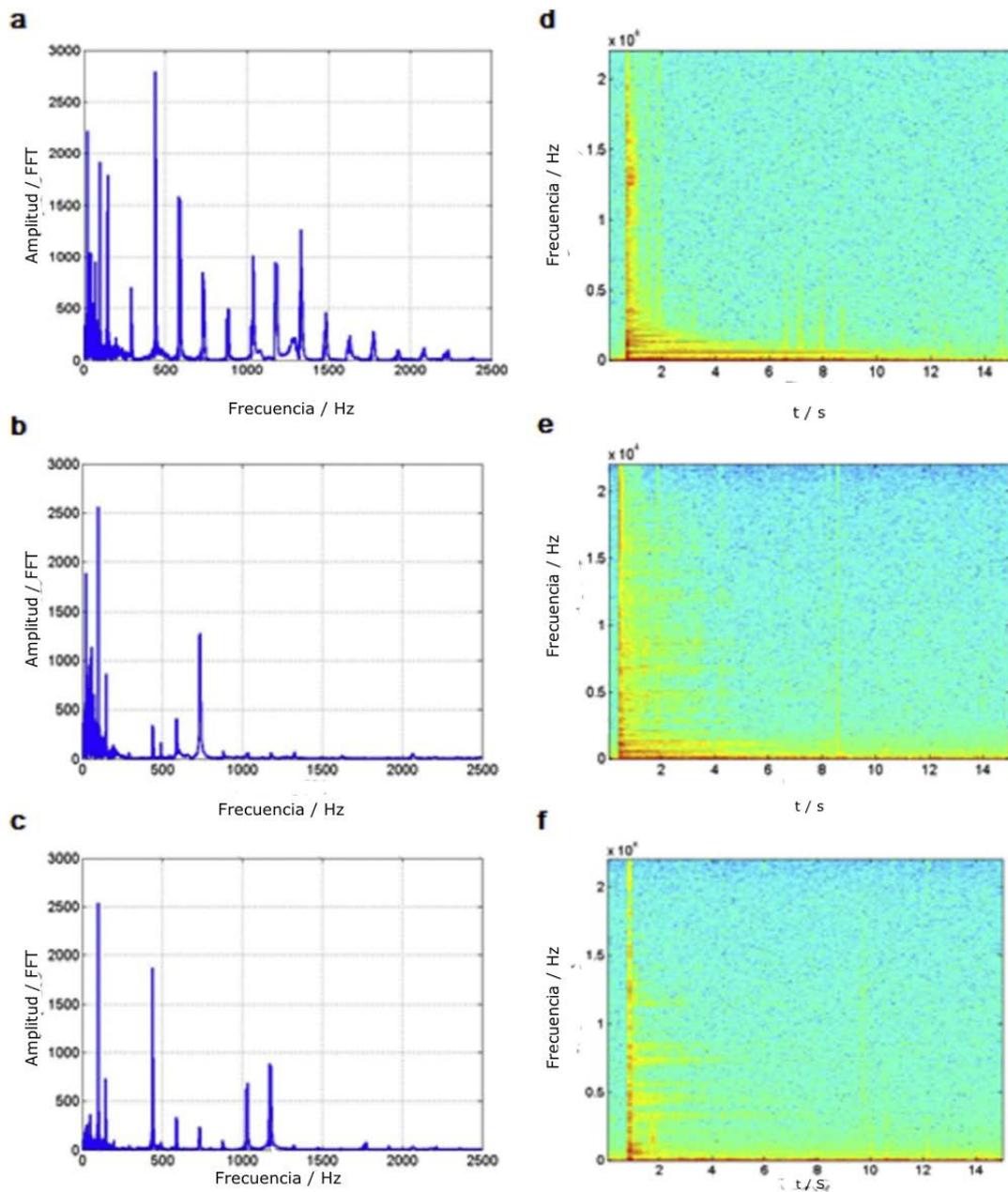


Fig. 42. Análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) y espectrograma de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético: (a) espectro de una cuerda nueva. (b) espectro al cabo de tres días. (c) espectro al cabo de siete días. (d) espectrograma de una cuerda nueva. (e) espectrograma al cabo de tres días. (f) espectrograma al cabo de siete días.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

La figura 42 describe el análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) y los espectrogramas de una cuerda D4 NW026 D´Addario para tres estadios concretos del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético. La figura 42a muestra la respuesta amplitud-frecuencia de una cuerda nueva antes de haber sido sometida al efecto del tratamiento con la disolución de sudor sintético.

Las frecuencias [20,30,38] de los modos de vibración obtenidos experimentalmente son coincidentes con los valores teóricos obtenidos a partir de la ecuación (17) del apartado 2.3.3. que proporciona las frecuencias características de la vibración de las cuerdas sujetas en sus dos extremos.

La figura 42d presenta el espectrograma inicial, que constituye la respuesta frecuencia-tiempo de la cuerda antes de poner en marcha el tratamiento de sudor sintético. La imagen evidencia que el modo de vibración fundamental a 147 Hz es claramente el que más perdura en el tiempo.

Las figuras 42b y 42c presentan las respuestas frecuencia-amplitud en el segundo y tercer estadio respectivamente. Es destacable que los modos de vibración por encima de 1500 Hz tienden a desaparecer.

En lo concerniente a los espectrogramas de las figuras 42e y 42f, la duración de la frecuencia fundamental a 147 Hz se va acortando a medida que va avanzando el proceso corrosivo.

La figura 43 expresa de forma cualitativa los valores de la amplitud correspondientes a cada uno de los modos de vibración presentes en las ondas de presión acústica obtenidas experimentalmente a lo largo del tiempo de exposición a la disolución corrosiva, tomando como referencia inicial la máxima amplitud correspondiente a las cuerdas nuevas.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

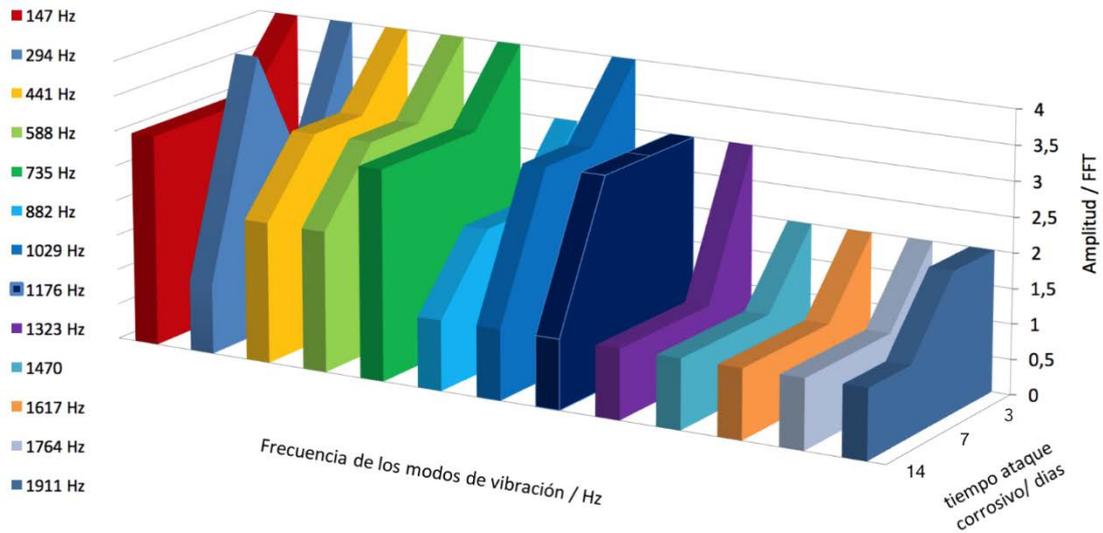


Fig. 43. Amplitud de los modos de vibración en función del tiempo de exposición al ataque corrosivo.

Finalmente, se pone de manifiesto la correlación entre los sucesivos valores de Rp y los correspondientes a la amplitud de la frecuencia fundamental (147 Hz), el modo en que ambos decrecen de forma similar se muestra en la figura 44.

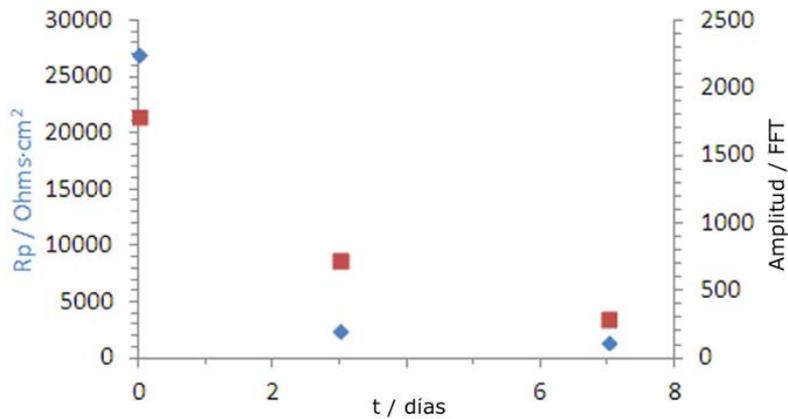


Fig. 44. ■ Resistencia de polarización Rp en función del tiempo de exposición para una cuerda D4 NW026 D'Addario sometida al tratamiento de sudor humano sintético; ◆ amplitud (FFT) de la frecuencia fundamental (147 Hz) en función del tiempo de exposición al ataque corrosivo.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

**4.2 Resultados y discusión del control de la corrosión mediante protección catódica por ánodo de sacrificio y por corriente impresa**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

---

### 4.2 Resultados y discusión del control de la corrosión mediante protección catódica por ánodo de sacrificio y por corriente impresa.

#### a) Análisis electroquímico: medida longitudinal de la resistividad

Se han analizado los resultados de la resistividad eléctrica obtenidos en función del tiempo de exposición a la disolución corrosiva de sudor humano sintético. Para una longitudinal de 70 cm de cuerda D4 NW026 y de sección transversal: 0.003 cm<sup>2</sup>.

A continuación, se presenta en la tabla 5 una muestra característica de los valores de la resistividad.

tiempo de exposición al ataque corrosivo /horas	Cuerdas nuevas 0h	24h	48h	120h
Resistividad ( $\mu\text{ohms.cm}$ )	62,20	62,68	62,78	62,83

Tabla 5. Valores correspondientes a los resultados de la resistividad eléctrica en función del tiempo de exposición a la disolución corrosiva para el análisis longitudinal en seco de una cuerda D4 NW026 protegida catódicamente por corriente impresa. Longitud de la cuerda: 70 cm, sección transversal: 0.003 cm<sup>2</sup>.

Es apreciable una tendencia creciente en las cifras, aunque de forma sensible, este resultado obedece a que las condiciones experimentales en las que se desarrolló el ataque corrosivo en la fase de protección catódica, se plantearon de manera que el proceso corrosivo no se produjera de forma tan virulenta como en la fase de caracterización electroquímica y vibro-acústica inicial.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En los ensayos experimentales preliminares, las cuerdas se rompieron de modo que el proceso de obtención de datos quedó interrumpido prematuramente.

Conviene recordar que en la fase de caracterización electroquímica y vibro-acústica se produjo un progresivo y notable aumento de la resistividad a medida que iba aumentando el tiempo de exposición de las cuerdas al electrolito oxidante, el hecho de que las cuerdas estuvieran sumergidas en la disolución de sudor humano sintético durante un periodo de 17 días de exposición proporcionó unas condiciones en las que la mayor intensidad del ataque corrosivo condujo a un sustancial aumento de la formación de óxidos superficiales y por lo tanto de mayor resistividad.

Como ya se ha explicado, esta modificación en el procedimiento experimental tuvo como objetivo asegurar la viabilidad del proceso de obtención de datos y a la vez conseguir una mayor aproximación a las condiciones reales (reproducibilidad) en las que las cuerdas de los instrumentos musicales se corroen.

### **a) Análisis electroquímico: medida de la resistencia de polarización ( $R_p$ )**

La tabla 6 y la figura 45 presentan las medidas de  $R_p$  de las cuerdas sometidas al efecto de la corrosión controlada mediante la aplicación de sudor humano sintético.

Los datos en negro se corresponden con las medidas obtenidas en el proceso corrosivo privado de protección, así mismo, los datos expresados en color verde se corresponden con los resultados obtenidos mediante la protección catódica por ánodo de sacrificio.

El enorme salto cuantitativo de los valores de  $R_p$  durante las 24 primeras horas de ataque corrosivo, pone de manifiesto que la corrosión se inicia con mucha intensidad y que gradualmente va tomando valores cada vez menores hasta que finalmente, a partir del primer día de exposición a la disolución de sudor, el proceso corrosivo se estabiliza entorno a un valor constante (de forma particular en las cuerdas sin protección).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

t/días	t/horas	Rp (Ohms·cm <sup>2</sup> ) Cuerda con protección catódica por ánodo de sacrificio	Rp (Ohms·cm <sup>2</sup> ) Cuerda sin protección
0	0	115574	115574
1	24	1401	876
2	48	1637	1102
3	72	681	1237
5	96	283	788

Tabla 6. Resistencia de polarización Rp en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por ánodo de sacrificio (datos en verde). Cuerda sin protección (datos en negro).

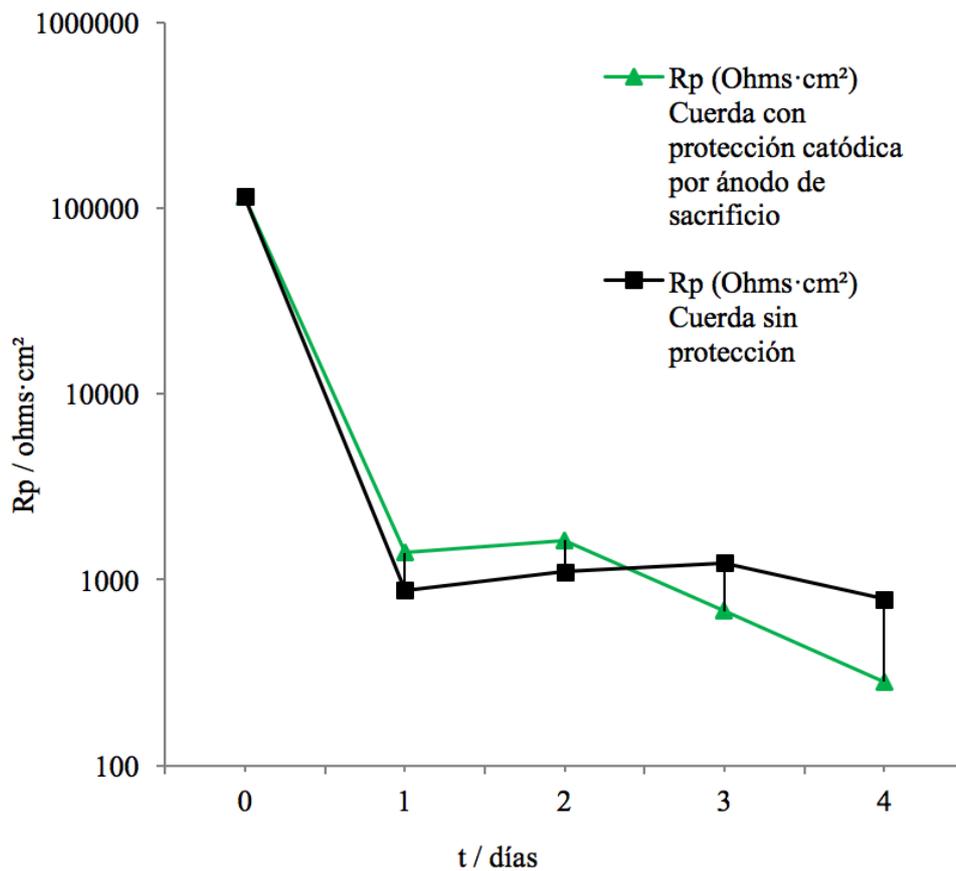


Fig. 45. Representación gráfica de la resistencia de polarización Rp en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por ánodo de sacrificio (gráfico en verde). Cuerda sin protección (gráfico en negro).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

No obstante, si bien parece que inicialmente el sistema de protección contra la corrosión es eficaz, apenas superadas las primeras 48 horas, los valores de Rp obtenidos a partir de la protección catódica por ánodo de sacrificio delatan la insolvencia del sistema, pues a partir de este punto los valores de Rp las cuerdas no protegidas se mantendrán superiores.

Análogamente, en la tabla 7 y en la figura 46 también se presentan los datos en negro, correspondientes a las medidas obtenidas del proceso corrosivo privado de protección y los datos expresados en color verde, obtenidos mediante la protección catódica por corriente impresa.

t/días	t/horas	Rp (Ohms·cm <sup>2</sup> ) Cuerda 3 con protección catódica por corriente impresa	Rp (Ohms·cm <sup>2</sup> ) Cuerda 1 sin protección catódica
0	0	115574	115574
1	24	3613	876
2	48	1903	1102
3	72	1587	1237
4	96	1387	788

Tabla 7. Resistencia de polarización Rp en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por corriente impresa (datos en verde). Cuerda sin protección (datos en negro).

Atendiendo al gráfico, el comportamiento de las cuerdas ante este sistema de protección catódica, durante las 24 primeras horas resulta idéntico al analizado previamente para el ánodo de sacrificio, aunque hay que recalcar que los valores de Rp para las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa, si bien también sufren la misma caída, sin embargo, se mantienen siempre en valores superiores.

Igualmente, a partir de las 24 horas de ataque corrosivo, la tendencia en los valores de Rp de las cuerdas protegidas es la de mantenerse siempre superiores a los obtenidos a partir de las cuerdas privadas de protección.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

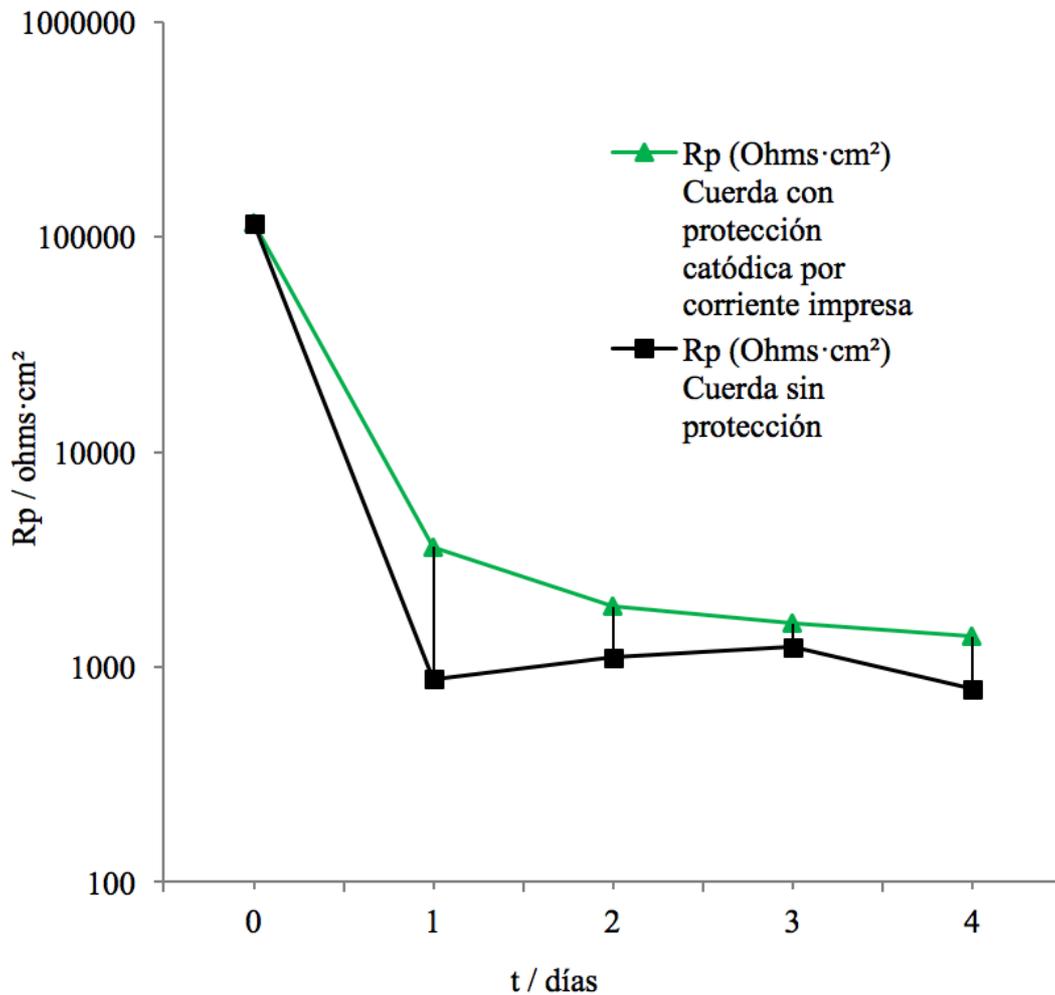


Fig. 46. Representación gráfica de la resistencia de polarización  $R_p$  en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por corriente impresa (gráfico en verde). Cuerda sin protección (gráfico en negro).

Así pues, los resultados del análisis  $R_p$  de las cuerdas en disolución de sudor indican que el método de protección catódica por corriente impresa es notablemente más eficaz para el control de la corrosión que la aplicación de ánodos de sacrificio.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### b) Análisis electroquímico: Análisis Tafel

**Análisis Tafel inicial:** En primer lugar, se realizó el análisis Tafel para una cuerda D4 D` Addario nueva.

Para iniciar el test de Tafel, [13-16, 18] las cuerdas se polarizaron a  $\pm 250\text{mV}$  a partir del potencial obtenido a circuito abierto. Así mismo se aplicó una velocidad de barrido de  $1\text{mV/s}$ . El área geométrica de la cuerda ensayada fue de  $0.622\text{cm}^2$ .

La información inicial obtenida fue la siguiente:

$i_{\text{corr}} = 0.10 \mu\text{A/cm}^2$ , pendiente catódica  $b_c = 0.11 \text{ V/dec}$ , pendiente anódica  $b_a = 0.17 \text{ V/dec}$ .

Los valores de  $b_c$  y de  $b_a$  se aplicaron en la ecuación de Stern Geary  $B = (b_c \times b_a) / (2.3(b_c + b_a))$  que proporcionó un valor de  $B = 0.03 \text{ V}$ .

Finalmente, la  $R_p$  se calculó mediante la expresión:

$$R_p = B / i_{\text{corr}} = 293800 \Omega \text{ cm}^2.$$

**Análisis Tafel final:** para la cuerda D4 D` Addario protegida catódicamente por ánodo de sacrificio durante 96 horas de exposición al ataque corrosivo mediante la disolución de sudor sintético.

Una vez finalizado el ciclo completo de medidas de  $R_p$ , se realizó el ensayo destructivo Tafel para las cuerdas en la disolución de sudor.

La información obtenida fue la siguiente:

$i_{\text{corr}} = 73.25 \mu\text{A/cm}^2$ , pendiente catódica  $b_c = 0.40 \text{ V/dec}$ , pendiente anódica  $b_a = 0.12 \text{ V/dec}$

Los valores de  $b_c$  y de  $b_a$  se aplicaron en la ecuación de Stern Geary  $B = (b_c \times b_a) / (2.3(b_c + b_a))$  que proporcionó un valor de  $B = 0.04 \text{ V}$ .

Finalmente, la  $R_p$  se calculó mediante la expresión:

$$R_p = B / i_{\text{corr}} = 544.10 \Omega \text{ cm}^2.$$

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

**Análisis Tafel final:** para la cuerda D4 D` Addario sin protección, expuesta durante 96 horas al ataque corrosivo mediante la disolución de sudor sintético

La información obtenida fue la siguiente:

$i_{\text{corr}} = 38.69 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , pendiente catódica  $b_c = 0.36 \text{ V}/\text{dec}$ , pendiente anódica  $b_a = 0.12 \text{ V}/\text{dec}$

Los valores de  $b_c$  y de  $b_a$  se aplicaron en la ecuación de Stern Geary  $B = (b_c b_a) / (2.3(b_c + b_a))$  que proporcionó un valor de  $B = 0.04 \text{ V}$ .

Finalmente, la  $R_p$  se calculó mediante la expresión:

$$R_p = B / i_{\text{corr}} = 999.30 \Omega \text{ cm}^2.$$

**Análisis Tafel final:** para la cuerda D4 D` Addario protegida catódicamente por corriente impresa durante 96 horas de exposición al ataque corrosivo mediante la disolución de sudor sintético.

La información obtenida fue la siguiente:

$i_{\text{corr}} = 20.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , pendiente catódica  $b_c = 0.26 \text{ V}/\text{dec}$ , pendiente anódica  $b_a = 0.15 \text{ V}/\text{dec}$

Los valores de  $b_c$  y de  $b_a$  se aplicaron en la ecuación de Stern Geary  $B = (b_c b_a) / (2.3(b_c + b_a))$  que proporcionó un valor de  $B = 0.04 \text{ V}$ .

En todos los casos analizados los datos obtenidos son consistentes, pues pertenecen al rango de valores característicos de los aceros al níquel [39].  $B$  en los aceros está comprendida entre 0.025 y 0.052 voltios.

Finalmente, la  $R_p$  se calculó mediante la expresión:

$$R_p = B / i_{\text{corr}} = 1986 \Omega \text{ cm}^2.$$

Así mismo todas las cifras de  $R_p$  obtenidas son coherentes con los valores obtenidos en el apartado anterior utilizando la técnica de la resistencia de polarización. En la tabla 8 se incluyen los datos más significativos del análisis Tafel.

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

<b>Análisis Tafel</b>	$i_{\text{corr}} / \mu\text{A}/\text{cm}^2$	B / v	$R_p / \Omega \text{ cm}^2$
Condiciones iniciales	<b>0.10</b>	<b>0.03</b>	<b>293800</b>
Final del ataque corrosivo sin protección	<b>38.69</b>	<b>0.04</b>	<b>999.30</b>
Final del ataque corrosivo con protección catódica por ánodo de sacrificio	<b>73.25</b>	<b>0.04</b>	<b>544.10</b>
Final del ataque corrosivo con protección catódica mediante corriente impresa	<b>20.33</b>	<b>0.04</b>	<b>1986</b>

Tabla 8. Resultados más relevantes del análisis Tafel en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026.

Así pues, los resultados del test de Tafel son muy relevantes, al término de 96 horas de ataque corrosivo, en la cuerda D4 NW026 D` Addario que ha sido privada de protección, la magnitud final de  $i_{\text{corr}}$  prácticamente ha duplicado el correspondiente resultado obtenido en la cuerda que ha sido sometida a protección catódica por corriente impresa.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

### c) Análisis gravimétrico de la pérdida de hierro

En la tabla 9 se dispone la información correspondiente al análisis gravimétrico de la pérdida de hierro de una cuerda D4 NW026 que ha permanecido 96 horas expuesta a la disolución de sudor sintético. En la columna de la derecha están dispuestas las cifras correspondientes a la cuerda protegida catódicamente por ánodo de sacrificio (datos en verde), en la columna de la izquierda las correspondientes a la cuerda sin protección (datos en negro).

masa inicial cuerda sin protección :	2,4990	masa inicial cuerda con protección catódica por ánodo de sacrificio :	2,5250
masa final cuerda sin protección (óxido eliminado) :	2,4795	masa final cuerda con protección catódica por ánodo de sacrificio (óxido eliminado) :	2,5047
Pérdida de hierro (g) :	0,0195 (0,8 %)	Pérdida de hierro (g) :	0,0203 (0,8%)

Tabla 9. Análisis gravimétrico de la pérdida de hierro en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por ánodo de sacrificio (datos en verde). Cuerda sin protección (datos en negro).

La masa relativa (%) de la pérdida de hierro obtenida en la medida en ambas cuerdas; con y sin protección, ha sido similar, del orden del 0,8 %.

En la tabla 10 se dispone la información correspondiente al análisis gravimétrico de la pérdida de hierro de una cuerda D4 NW026 que ha permanecido 96 horas expuesta a la disolución de sudor sintético. En la columna de la derecha están dispuestas las cifras correspondientes a la cuerda protegida catódicamente por corriente impresa (datos en verde), en la columna de la izquierda las correspondientes a la cuerda sin protección (datos en negro).

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

masa inicial cuerda sin protección :	2,4750	masa inicial cuerda con protección catódica por corriente impresa :	2,4470
masa final cuerda sin protección (óxido eliminado) :	2,4505	masa final cuerda con protección catódica por corriente impresa (óxido eliminado) :	2,4317
Pérdida de hierro (g) :	0,0245 (1,0 %)	Pérdida de hierro (g) :	0,0153 (0,6 %)

---

Tabla 10. Análisis gravimétrico de la pérdida de hierro en función del tiempo de exposición a la disolución de sudor sintético para una cuerda D4 NW026. Cuerda protegida catódicamente por corriente impresa (datos en verde). Cuerda sin protección (datos en negro).

Los datos obtenidos en las medidas gravimétricas revelan la eficacia de la protección catódica, así pues, las cuerdas sometidas a corriente impresa se han oxidado de promedio un 40 % menos que las no tratadas.

A continuación, se presentan los diagramas de Nyquist y Bode correspondientes al análisis longitudinal y sin disolución de una cuerda D4 NW026. Los datos expuestos son los obtenidos al final de cada ciclo de: 24h, 48h, 120h y 144h de ataque corrosivo exclusivamente bajo el efecto de la protección catódica por corriente impresa.

### d) Análisis electroquímico: Diagramas de Nyquist y Bode. Análisis EIS longitudinal sin disolución

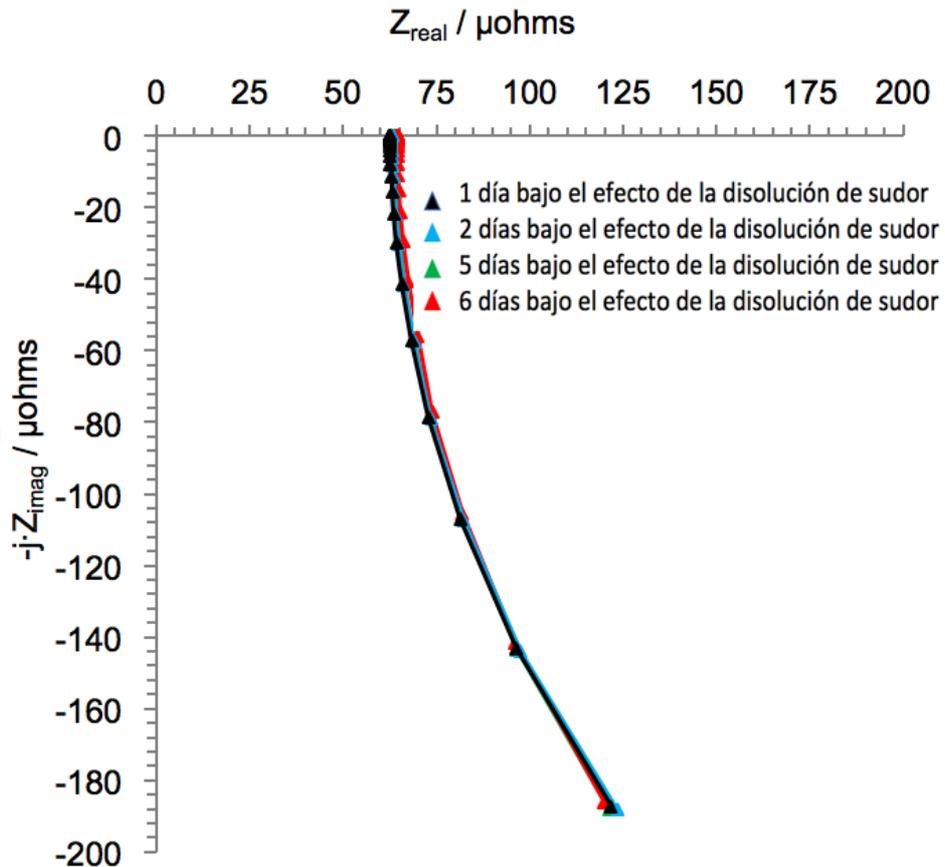


Fig. 47. Diagrama de Nyquist correspondiente al análisis longitudinal y sin disolución de una cuerda D4 NW026 sometida a protección catódica mediante corriente impresa. El gráfico presenta resultados significativos del ataque corrosivo de las cuerdas en la disolución de sudor sintético. Sección transversal de la cuerda: 1 cm<sup>2</sup>, longitud: 1cm.

Las figuras 47 y 48 presentan el diagrama de Nyquist y un detalle ampliado del mismo diagrama, con resultados significativos del ataque corrosivo de las cuerdas por la disolución de sudor sintético.

Las medidas que se presentan son sólo una muestra característica del conjunto de datos obtenidos tras finalizar cada uno de los estadios planificados del ataque corrosivo, para 24, 48, 72, 96, 120 y 144 horas respectivamente.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

Como ya se dedujo en la fase de caracterización electroquímica, la geometría característica de las cuerdas, consistente en dos cables de acero, el primero que constituye el núcleo central y el segundo que permanece arrollado al núcleo, explica que los datos experimentales dejen constancia de un claro comportamiento inductivo.

Los diagramas de Nyquist muestran como la reactancia inductiva decrece a medida que la frecuencia alcanza valores cada vez menores. [40]

Por otra parte, tal y como se aprecia en la figura 48, la componente resistiva pura de la impedancia va adquiriendo valores sensiblemente mayores a medida que avanza el proceso corrosivo.

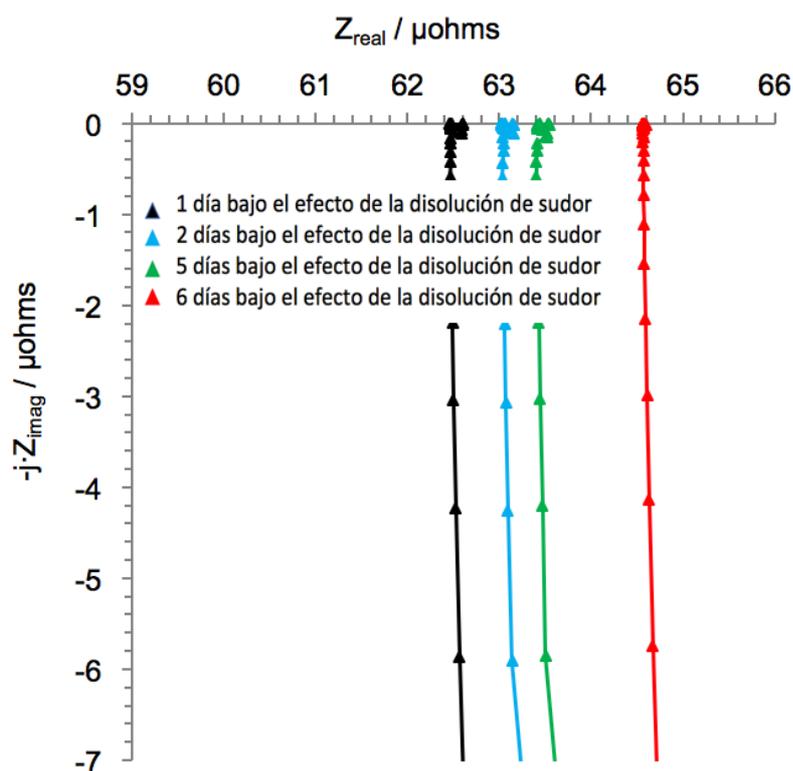


Fig. 48. Diagrama de Nyquist correspondiente al análisis longitudinal y sin disolución de una cuerda D4 NW026 sometida a protección catódica mediante corriente impresa. El gráfico presenta un detalle ampliado de resultados significativos del ataque corrosivo de las cuerdas en la disolución de sudor sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1 \text{ cm}^2$ , longitud: 1cm.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

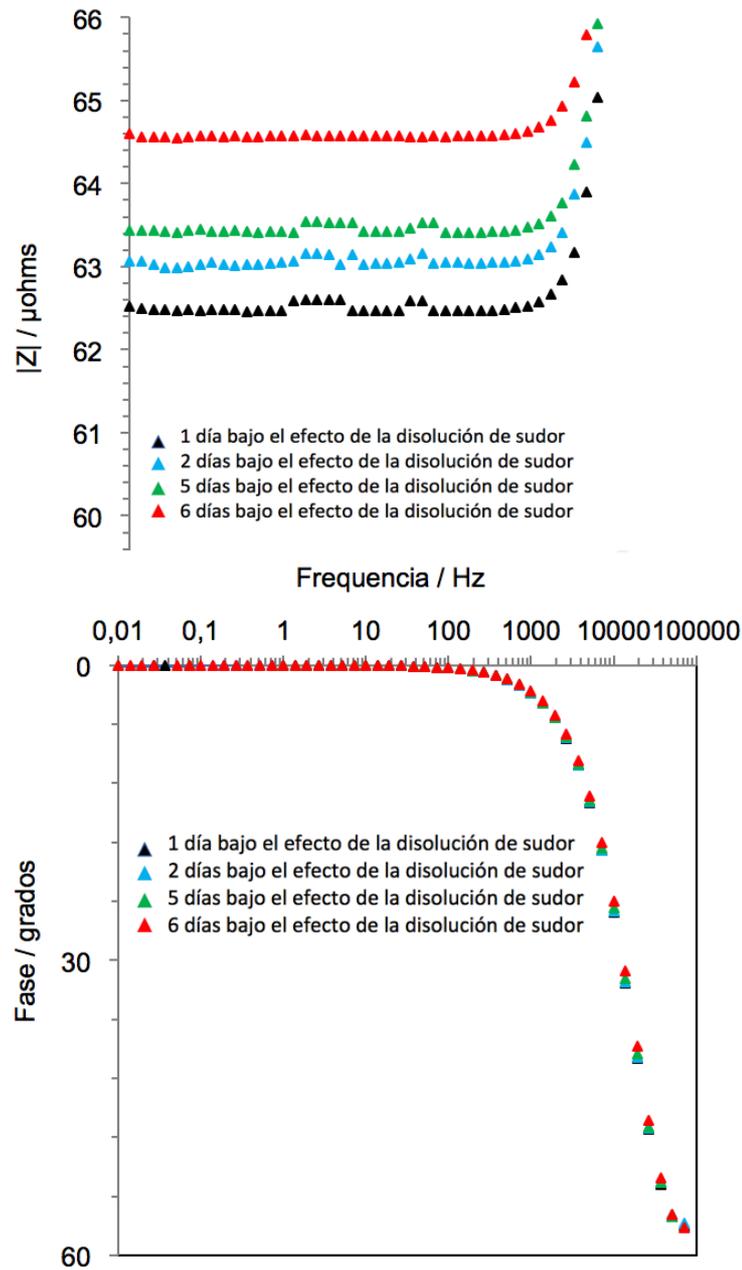


Fig. 49. Diagrama de Bode obtenido a partir del análisis longitudinal sin disolución de una cuerda D4 NW026 D'Addario sometida a protección catódica mediante corriente impresa. El gráfico presenta resultados significativos del ataque corrosivo de las cuerdas en la disolución de sudor sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{ cm}^2$ , longitud:  $1\text{ cm}$ .

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

Así mismo, los datos expuestos en el diagrama de Bode de la figura 49, en la gráfica que presenta los valores de fase en función de la frecuencia, revelan un comportamiento que gradualmente se va tornando más resistivo a medida que disminuye el valor de la frecuencia.

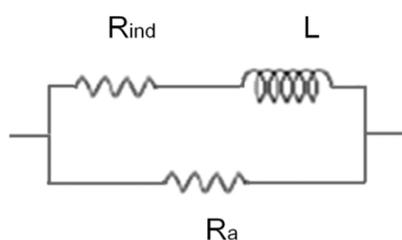


Fig. 50. Circuito equivalente correspondiente al análisis de la espectroscopía de impedancia electroquímica EIS, de forma longitudinal y sin disolución, para una cuerda D4 NW026 D'Addario sometida a protección catódica por corriente impresa.

t / días	1 día de corrosión	2 días de corrosión	5 días de corrosión	6 días de corrosión
R <sub>a</sub> (Ω)	6,86x10 <sup>-5</sup>	6,94x10 <sup>-5</sup>	6,96x10 <sup>-5</sup>	7,08x10 <sup>-5</sup>
L (Henrios)	5,66x10 <sup>-10</sup>	5,72x10 <sup>-10</sup>	5,64x10 <sup>-10</sup>	5,54 x10 <sup>-10</sup>
R <sub>ind</sub> (Ω)	7,01x10 <sup>-4</sup>	6,96x10 <sup>-4</sup>	7,21x10 <sup>-4</sup>	7,34 x10 <sup>-4</sup>

Tabla 11. Valores obtenidos para los parámetros del circuito equivalente de la figura 49, correspondientes al análisis longitudinal y sin disolución mediante EIS para una cuerda D4 NW026 D'Addario sometida a protección catódica por corriente impresa. Sección transversal de la cuerda: 1 cm<sup>2</sup>, longitud: 1cm.

Se ha utilizado el circuito eléctrico equivalente, que ya quedó definido en la fase de caracterización electroquímica y acústica y se muestra nuevamente en la figura 50. Se han realizado sucesivas medidas longitudinales y sin disolución de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y se ha caracterizado el comportamiento eléctrico de las cuerdas D4 NW026.

La tabla 11 presenta los valores obtenidos después de haber ajustado los datos obtenidos experimentalmente al circuito eléctrico equivalente.

Estos datos están referidos a 1 cm<sup>2</sup> de sección transversal y a 1cm de la longitud de la cuerda. Las medidas que se presentan son sólo una muestra característica del conjunto de datos obtenidos tras finalizar cada uno de los

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

estadios planificados del ataque corrosivo, para 24, 48, 72, 96, 120 y 144 horas respectivamente.

Como se pone de manifiesto en la tabla 11 y en la figura 51 a, el valor de la resistencia asociada al alma de acero ( $R_a$ ) experimenta un progresivo crecimiento hasta los 71  $\mu\text{ohms}$ , y prueba gráfica de ello son las microfotografías que se exhiben en el apartado g), mostrando el proceso de corrosión que el núcleo de acero está sufriendo a través de los intersticios situados entre las vueltas del arrollamiento.

Así mismo, en la figura 51 b el valor de la resistencia ( $R_{ind}$ ) asociada a la inductancia del arrollamiento, mantiene también una tendencia ascendente hasta alcanzar los 734  $\mu\text{ohms}$ .

Sin embargo, como puede apreciarse en la tabla 11, los datos relativos a la inductancia presentan un valor constante que oscila alrededor de  $5.6 \times 10^{-10}$  Henrios.

a

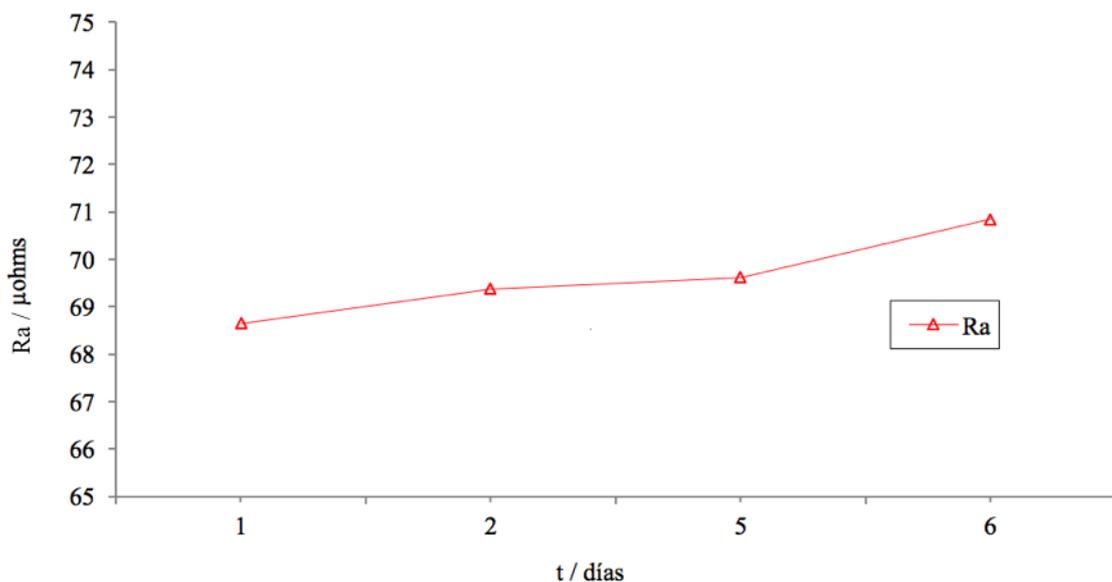


Fig. 51.a. Representación gráfica de  $R_a$  obtenida a partir del análisis longitudinal y sin disolución mediante EIS para una cuerda D4 NW026 D'Addario sometida a protección catódica por corriente impresa. Sección transversal de la cuerda:  $1 \text{ cm}^2$ , longitud: 1cm.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

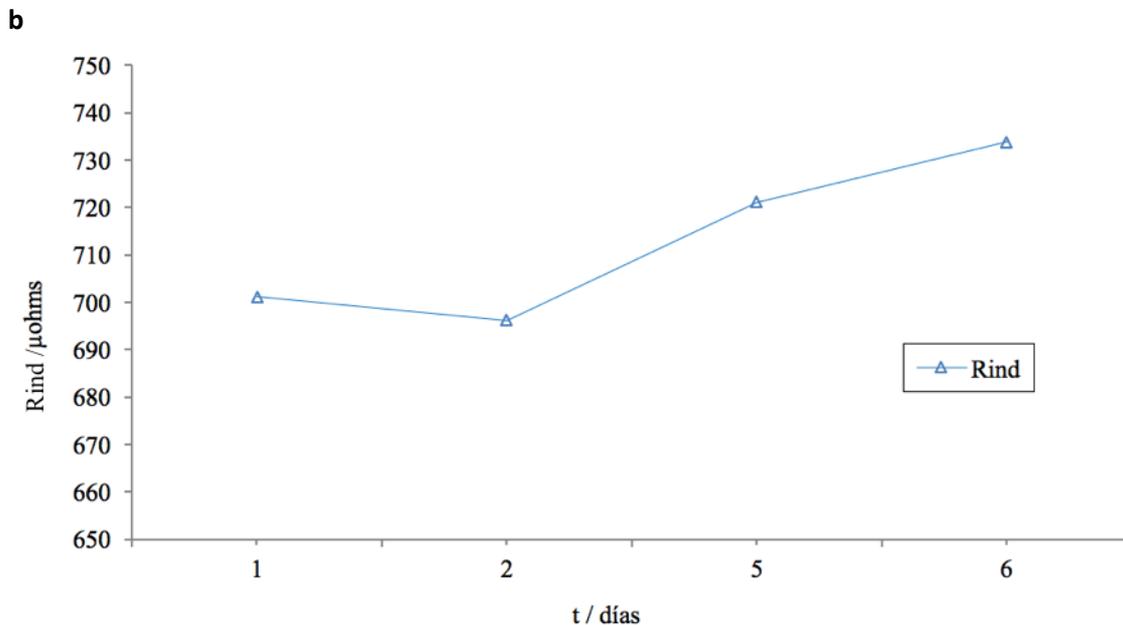


Fig. 51.b. Representación gráfica de  $R_{ind}$  obtenida a partir del análisis longitudinal y sin disolución mediante EIS para una cuerda D4 NW026 D`Addario sometida a protección catódica por corriente impresa. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{ cm}^2$ , longitud: 1cm.

### e) Análisis electroquímico: Diagramas de Nyquist. Análisis EIS en disolución

La figura 52 presenta el correspondiente diagrama de Nyquist del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D`Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo sin haber sido aplicada protección alguna contra la corrosión. Análogamente la figura 53 aporta una imagen ampliada en la que se muestran las frecuencias características del análisis EIS (en las figuras 52 y 53 no se ha incluido el diagrama correspondiente a las cuerdas nuevas pues sus valores son tan elevados que se salen de rango y no permiten apreciar con detalle el resto de diagramas).

Las medidas experimentales con las cuerdas se realizaron en el interior de una disolución de sudor humano sintético. Por comparación con las condiciones aplicadas en el procedimiento experimental de caracterización electroquímica y vibroacústica correspondiente a la fase inicial, la intensidad del proceso corrosivo en la fase de protección catódica es de menor magnitud, por lo que las consecuencias visibles en la morfología del electrodo presentan

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

menos defectos, microporosidades e irregularidades que en la etapa inicial. [39]

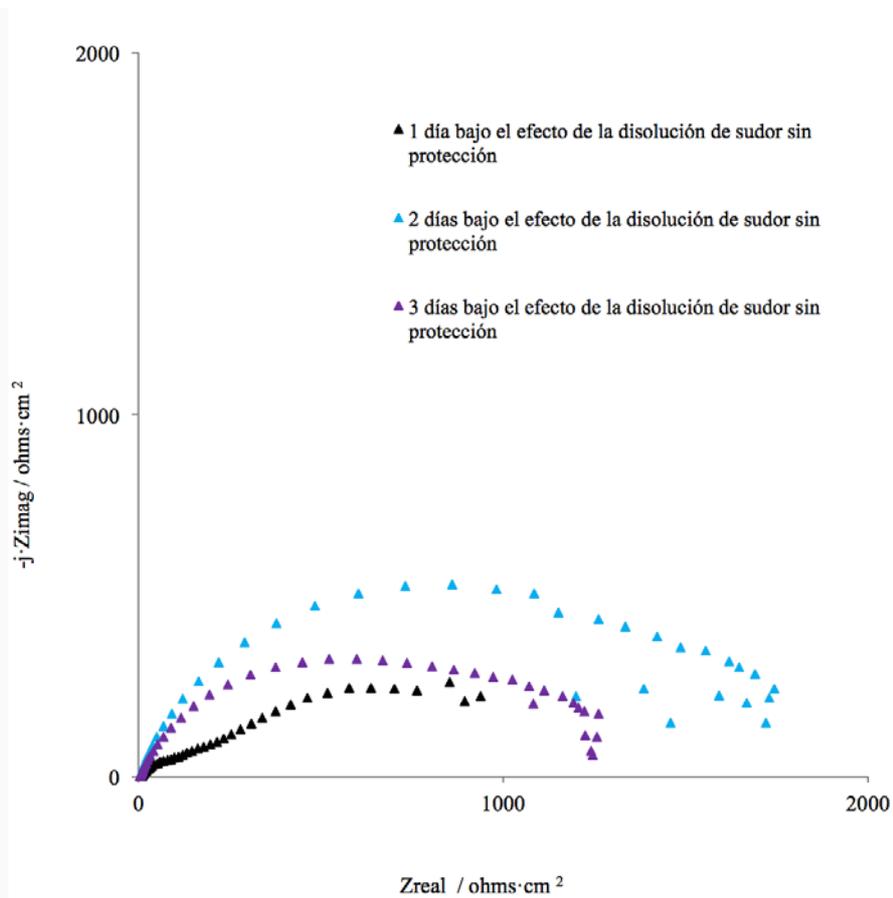


Fig. 52. Diagrama de Nyquist del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo sin haber sido aplicada protección alguna contra la corrosión. El análisis experimental de las cuerdas se ha realizado en el interior de una disolución de sudor humano sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{cm}^2$ , longitud: 1 cm.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

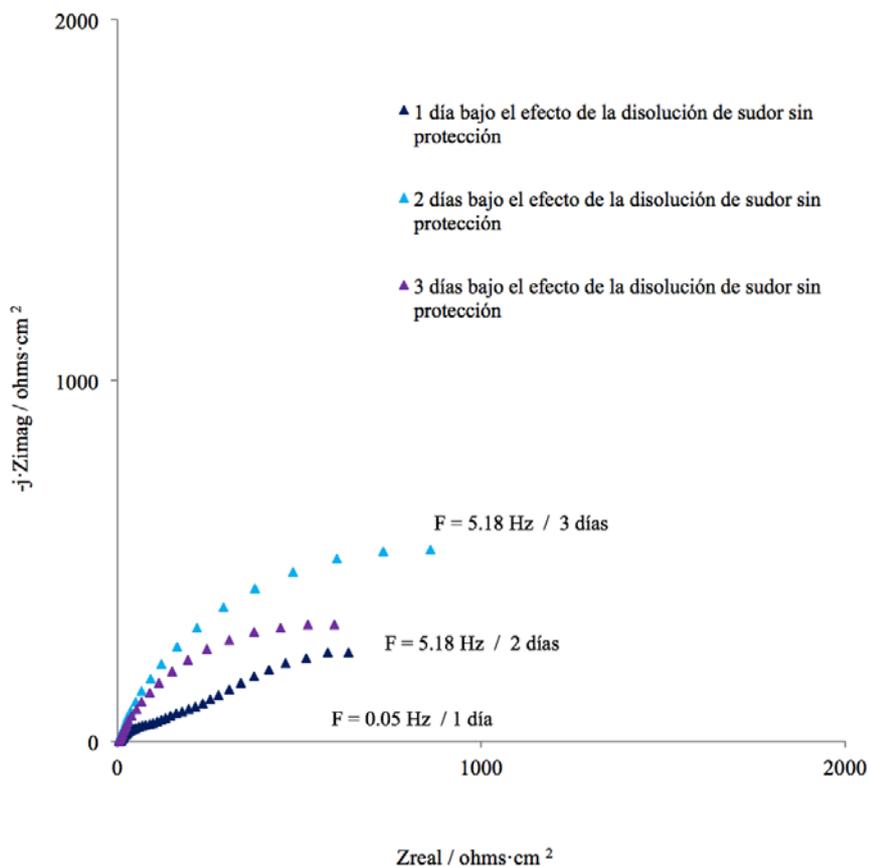


Fig. 53. Diagrama de Nyquist con una imagen ampliada en la que se muestran las frecuencias características del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo sin haber sido aplicada protección alguna contra la corrosión. El análisis experimental de las cuerdas se ha realizado en el interior de la disolución de sudor humano sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{cm}^2$ , longitud: 1 cm.

El resultado del ataque corrosivo en la muestra de la figura 64, expone una microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 72h a la disolución de sudor concentrado sin protección. En la morfología superficial de dicha cuerda es apreciable el color pardo-rojizo de los óxidos en los intersticios ubicados entre las vueltas consecutivas del arrollamiento, así como también son apreciables defectos e irregularidades propios del deterioro producido por la corrosión.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Todo este proceso se hace patente en el diagrama de Nyquist de la figura 52, la misma muestra el achatamiento de los semicírculos característico del deterioro que han sufrido las cuerdas por efecto de la corrosión.

Del diagrama de Nyquist también debe destacarse el diámetro de los semicírculos, pues su valor está relacionado directamente con la magnitud de la resistencia de polarización ( $R_p$ ), así pues, el menor de los semicírculos (en negro) que corresponde a las primeras 24 horas del proceso corrosivo, da muestras de un ataque corrosivo de notable rapidez e intensidad.

Resulta destacable la comparación del diagrama de Nyquist correspondiente a las 24 primeras horas del proceso corrosivo carente de protección con el correspondiente al de la figura 54 y al de la figura 55 que aporta una imagen ampliada en la que se muestran las frecuencias características del análisis EIS.

En dichas figuras se expone el diagrama de Nyquist del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D` Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo habiéndose aplicado protección catódica por corriente impresa.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

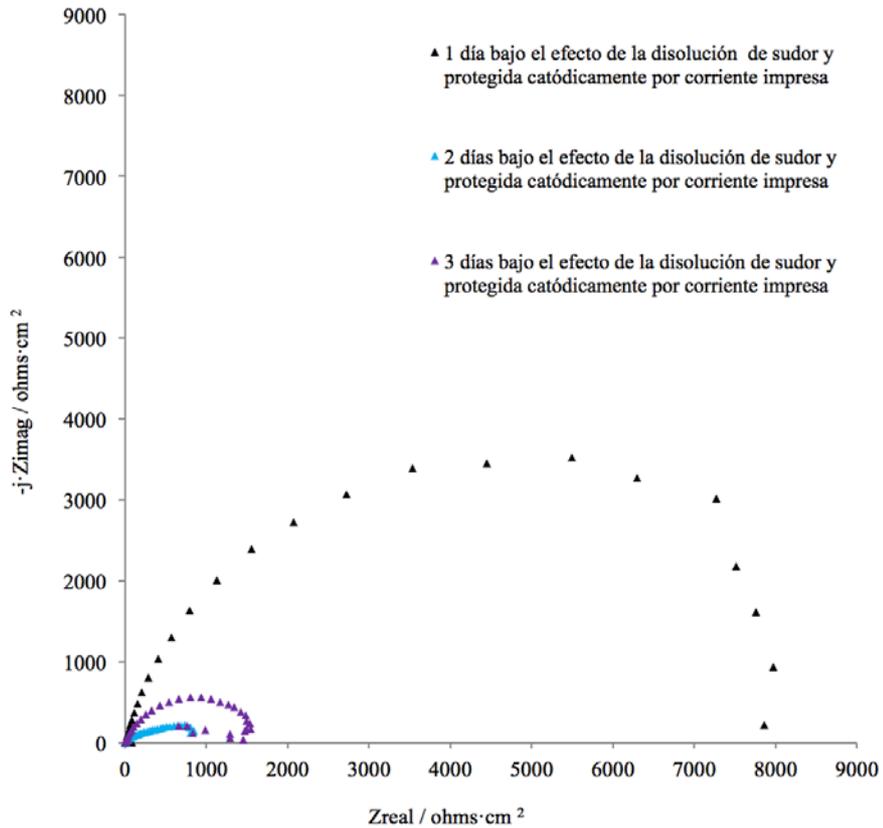


Fig. 54. Diagrama de Nyquist del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo habiéndose aplicado protección catódica por corriente impresa. El análisis experimental de las cuerdas se ha realizado en el interior de una disolución de sudor humano sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{cm}^2$ , longitud: 1 cm.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

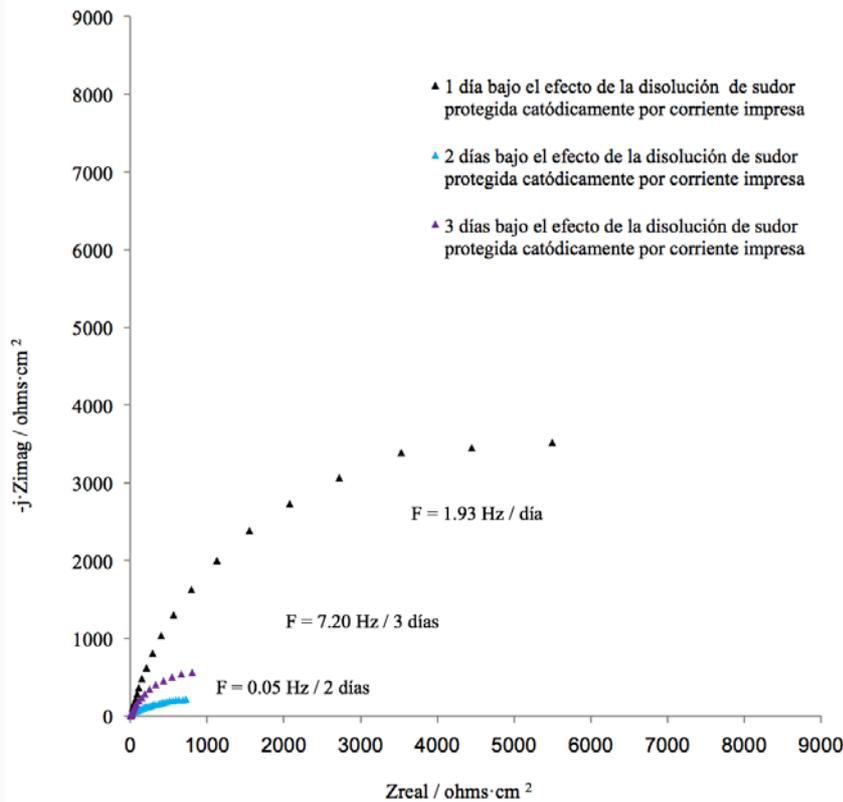


Fig. 55. Diagrama de Nyquist con una imagen ampliada en la que se muestran las frecuencias características del análisis EIS de una cuerda D4 NW026 D`Addario a lo largo de 24h, 48h y 72h de ataque corrosivo habiéndose aplicado protección catódica por corriente impresa. El análisis experimental de las cuerdas se ha realizado en el interior de la disolución de sudor humano sintético. Sección transversal de la cuerda:  $1\text{cm}^2$ , longitud: 1 cm.

En las figuras 54 y 55, debe destacarse la gran diferencia del diámetro correspondiente al semicírculo que ilustra las primeras 24 horas del proceso corrosivo (en color negro) en comparación con el resto de semicírculos. Además, el semicírculo presenta poco achatamiento, lo que es indicativo de un menor número de irregularidades, superficie más homogénea con menor porosidad, indicativo probablemente de un menor ataque corrosivo.

Es un hecho que la magnitud del diámetro correspondiente al diagrama de Nyquist equivale al valor de  $(R_p)$  y por lo tanto conociendo sus dimensiones se dispone de información directa sobre la cinética de la corrosión.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Así pues, se trata sin duda de una muestra de la eficacia del método, pues este semicírculo de mayores dimensiones obedece a un proceso más lento de corrosión en relación con el resto de medidas.

Los resultados obtenidos han determinado la necesidad de aplicar un circuito equivalente (figura 56) que se adapte a las particularidades derivadas de las condiciones experimentales. El proceso de corrosión, pues, se ha podido simular por una combinación de resistencias y un condensador.

En este caso, se ha recurrido al circuito propuesto por Randles [18]. La resistencia de transferencia de carga ( $R_T$ ) ión-electrón determina la velocidad de la reacción de corrosión del hierro y equivale a la magnitud medida como resistencia de polarización ( $R_p$ ) con las técnicas de corriente continua y puede utilizarse en la fórmula de Stern-Geary para estimar la  $i_{corr}$ .

[18,41-50]  $R_e$ , representa la resistencia ofrecida por el electrolito al paso de la corriente y  $C_{dc}$ , la capacidad de la doble capa en torno al electrodo.

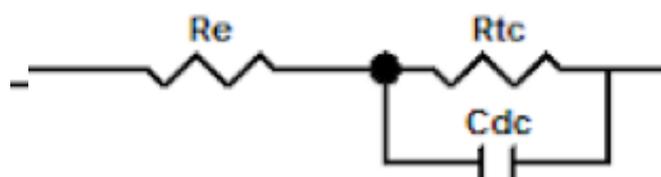


Fig. 56. Circuito eléctrico equivalente de una cuerda D4 NW026 sumergida en la disolución de sudor humano sintético para el análisis de EIS.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

t/días	t/horas	Re cuerda sin protección/ ohms.cm <sup>2</sup>	Re con protección catódica por corriente impresa / ohms . cm <sup>2</sup>	Re con protección catódica por ánodo de sacrificio / ohms . cm <sup>2</sup>
1	24	11	9	11
2	48	6	6	11
3	72	7	5	6
4	96	7	6	

t/días	t/horas	R <sub>T</sub> (Rp) cuerda sin protección/ ohms.cm <sup>2</sup>	R <sub>T</sub> (Rp) con protección catódica por corriente impresa / ohms . cm <sup>2</sup>	R <sub>T</sub> (Rp) con protección catódica por ánodo de sacrificio / ohms . cm <sup>2</sup>
1	24	357	6629	1062
2	48	1229	1287	1820
3	72	804	1187	320
4	96	668	2402	

t/días	t/horas	Cdc cuerda sin protección / μF.cm <sup>2</sup>	Cdc con protección catódica por corriente impresa / μF .cm <sup>2</sup>	Cdc con protección catódica por ánodo de sacrificio / μF . cm <sup>2</sup>
1	24	7	1	2
2	48	2	2	3
3	72	3	2	1
4	96	19	2	

Tabla 12. Valores de Re, R<sub>T</sub> (Rp) y Cdc obtenidos a partir del circuito equivalente de la figura 56 correspondientes al análisis en disolución mediante EIS durante el ataque corrosivo.

Por otra parte, se observa como en la interfase entre una cuerda de guitarra y la solución de sudor (figura 57 en color azul) la resistencia conceptualmente equivalente a Rp, relativa a la transferencia de carga (reacción de corrosión) se inicia con unos valores comparativamente muy elevados hasta el segundo día de proceso corrosivo, evidenciándose su notable capacidad para evitar el ataque corrosivo, reduciendo su velocidad.

Entre las 48 y las 72 horas su valor se consolida, manteniéndose estable la protección catódica por corriente impresa.

Finalmente, en el tramo final hasta el cuarto día, la pendiente positiva confirma la eficacia del sistema de protección.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

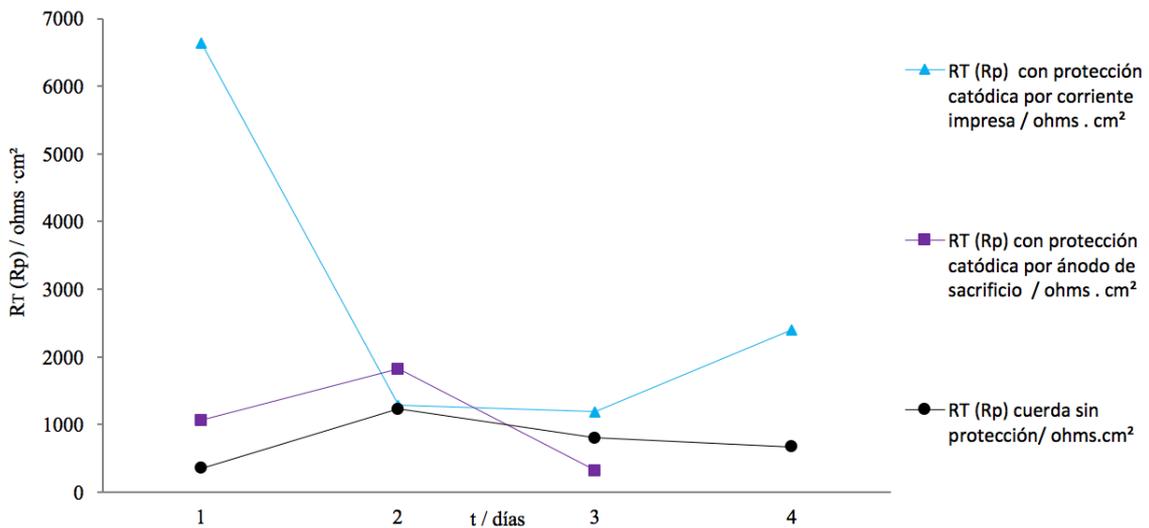


Fig. 57. Representación gráfica de los valores de Rtc obtenidos a partir del circuito equivalente de la figura 56 correspondientes al análisis en disolución mediante EIS durante el ataque corrosivo.

Se puede afirmar a partir de los resultados obtenidos en el circuito equivalente, la solvencia de la protección catódica mediante corriente impresa, así como la superioridad de este método con respecto al uso de ánodos de sacrificio.

### f) Análisis de la morfología superficial mediante microscopio estereoscópico

Las siguientes microfotografías se realizaron mediante microscopio estereoscópico al final de cada uno de los estadios de corrosión. A la izquierda están dispuestas todas las imágenes de las cuerdas que han sido sometidas a corrosión controlada privadas de protección, estando a su derecha las protegidas catódicamente por corriente impresa.

En primer lugar, se puede apreciar el estado de las cuerdas nuevas (figuras 58 y 59)

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

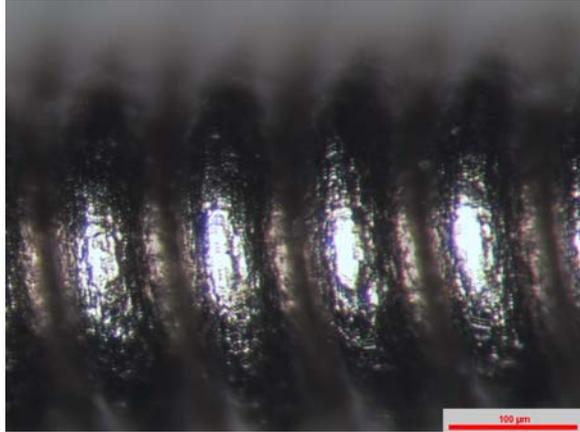


Fig. 58. Microfotografía de cuerda nueva 3D D'Addario antes de ser sometida al efecto de la disolución de sudor concentrado.

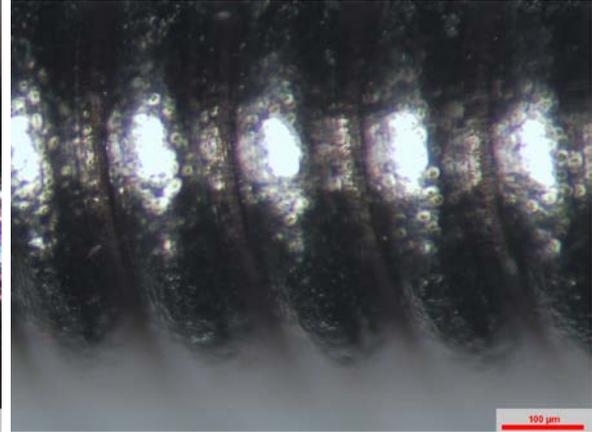


Fig. 59. Microfotografía de cuerda nueva 3D D'Addario antes de ser sometida al efecto de la disolución de sudor concentrado.

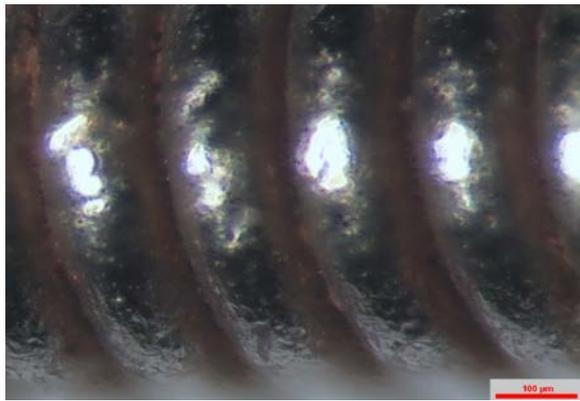


Fig. 60. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 24h al efecto de la disolución de sudor concentrado sin protección.

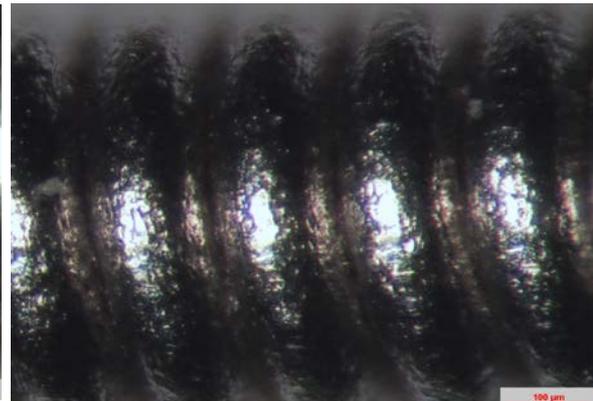


Fig. 61. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario protegida catódicamente por corriente impresa tras ser sometida 24h a disolución de sudor concentrado.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

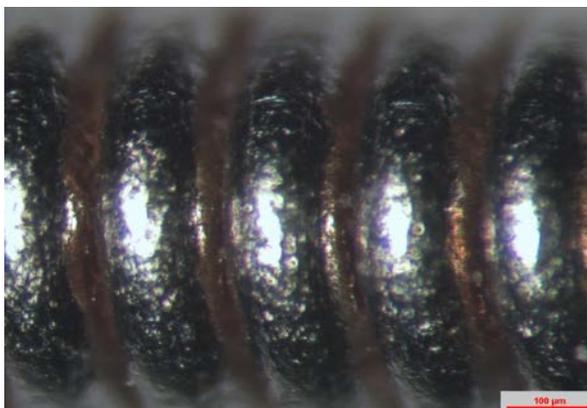


Fig. 62. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 48h a la disolución de sudor concentrado sin protección.

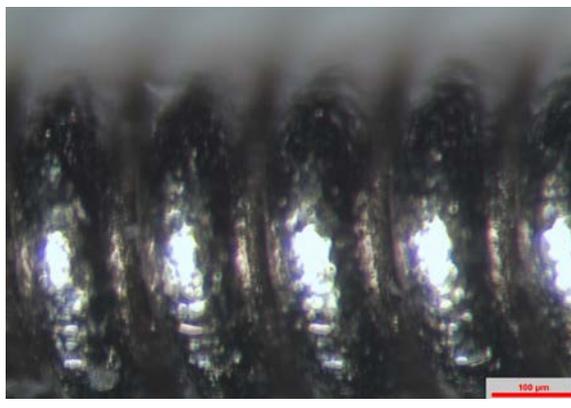


Fig. 63. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 48h a la disolución de sudor concentrado protegida catódicamente por corriente impresa.

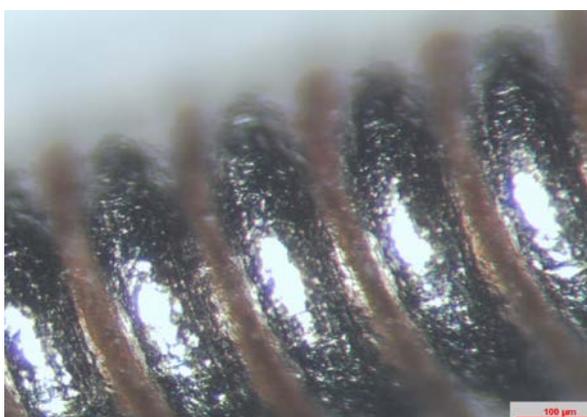


Fig. 64. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 72h a la disolución de sudor concentrado sin protección.

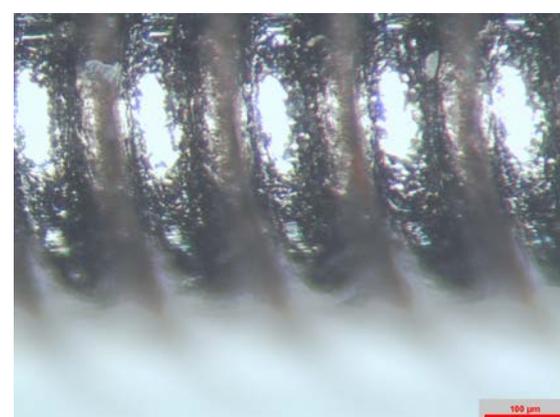


Fig. 65. Microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 72h a la disolución de sudor concentrado protegida catódicamente por corriente impresa.

Desde la figura 60 hasta la 67, la serie de microfotografías mantienen con claridad el contraste visual entre las imágenes dispuestas a la izquierda (desprovistas de protección) y sus homólogas situadas a la derecha protegidas catódicamente.

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En las imágenes de la izquierda, se aprecia como el depósito del óxido va aumentando gradualmente su intensidad sobre la superficie de la cuerda, en los intersticios situados entre las vueltas de arrollamiento. Sin embargo, a medida que avanza el proceso corrosivo, en las cuerdas protegidas (a la derecha) se aprecia una menor aparición de óxido.

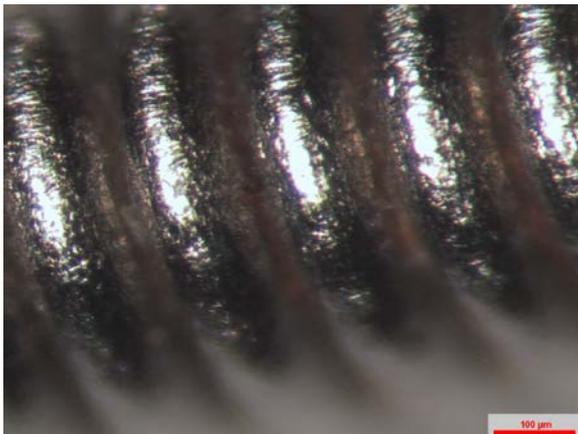


Fig. 66. microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 96h a disolución de sudor concentrado sin protección.

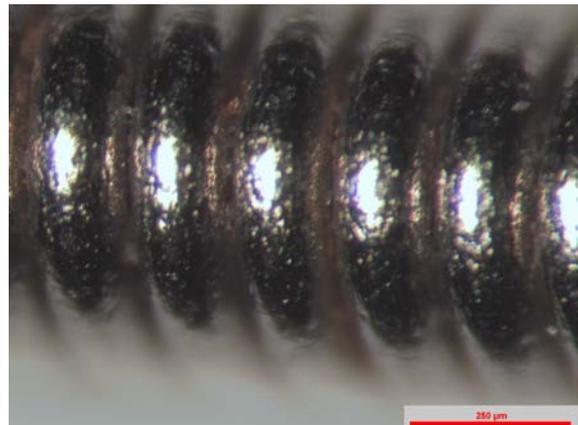


Fig. 67. microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 96h a disolución de sudor concentrado protegida catódicamente por corriente impresa.

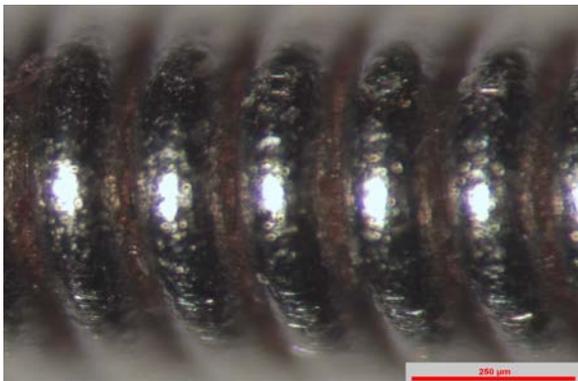


Fig. 68. microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 120h a la disolución de sudor concentrado sin protección.

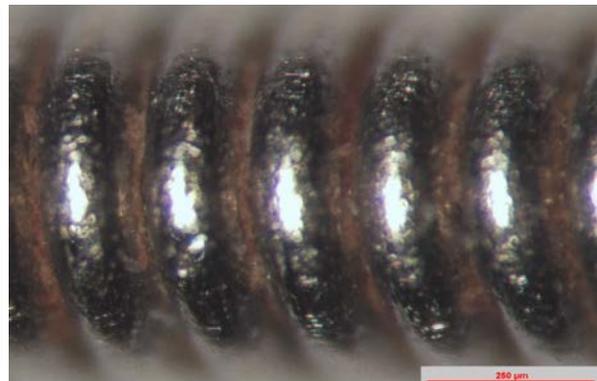


Fig. 69. microfotografía de cuerda 3D D'Addario sometida 120h a la disolución de sudor concentrado protegida catódicamente por corriente impresa.

Las microfotografías correspondientes a las figuras 68 (cuerda sin protección) y 69 (cuerda protegida) muestran la morfología superficial de las cuerdas habiendo transcurrido 120 horas de ataque corrosivo en la fase de protección

---

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

catódica, al comparar en su conjunto las imágenes mencionadas, no se aprecian diferencias notables, pues el deterioro producido por la corrosión es semejante en las dos.

De esta observación habría que reparar en que más allá de las 96 horas de ataque corrosivo, la eficacia de la protección catódica por corriente impresa no está garantizada.

### **g) Análisis vibro-acústico**

En las figuras 70.a y 70.b se exponen las representaciones gráficas de los análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) de una cuerda D4 NW026 D´Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético.

La figura 70.a se corresponde con el conjunto de espectros superpuestos de cuatro días consecutivos de ataque corrosivo de una cuerda privada de protección.

Durante las etapas que abarcaron: 0, 24, 48, 72 y 96 horas, las cuerdas se sometieron a un proceso de corrosión controlada. Como ya ha sido descrito anteriormente, con objeto de caracterizar las cuerdas electroquímica y acústicamente, al finalizar cada estadio, se realizaron las correspondientes medidas para obtener la información electroquímica y se registraron las señales acústicas correspondientes a las ondas de presión obtenidas experimentalmente a lo largo del tiempo de exposición a la disolución corrosiva.

Análogamente, La figura 70.b se corresponde con el conjunto de espectros superpuestos de cuatro días consecutivos de ataque corrosivo de una cuerda protegida catódicamente mediante corriente impresa.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

a

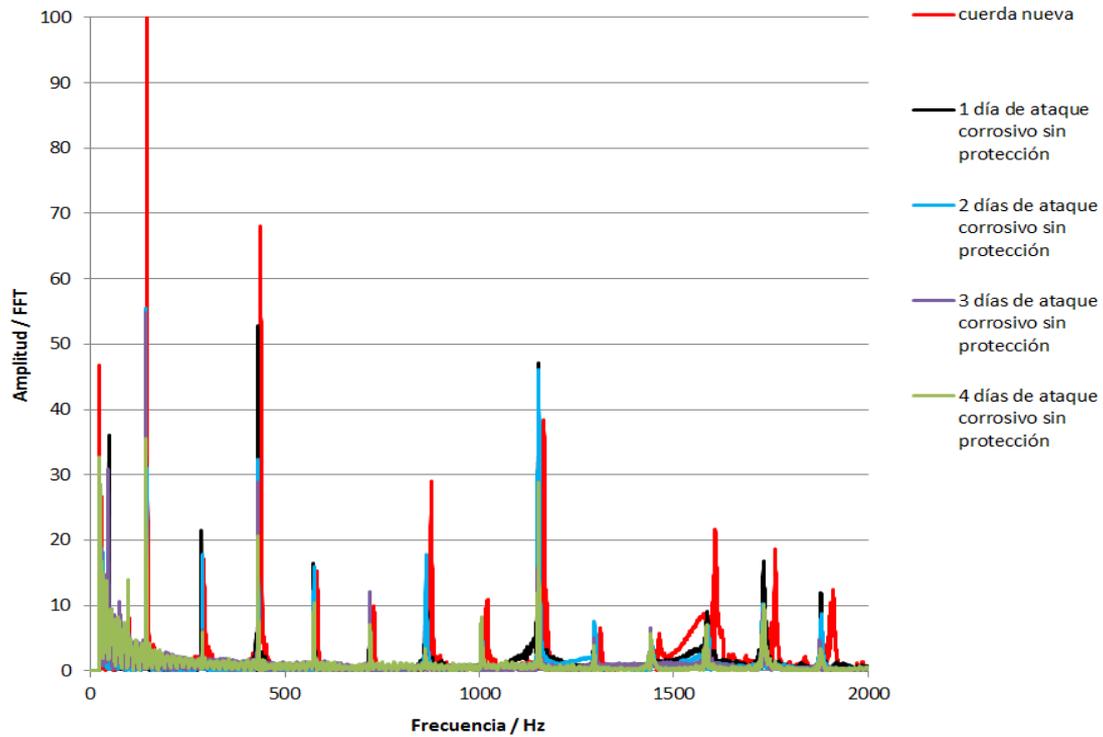


Fig. 70.a. Análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético: (a) representación gráfica de los espectros superpuestos de cuatro días de ataque corrosivo de una cuerda privada de protección.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

**b**

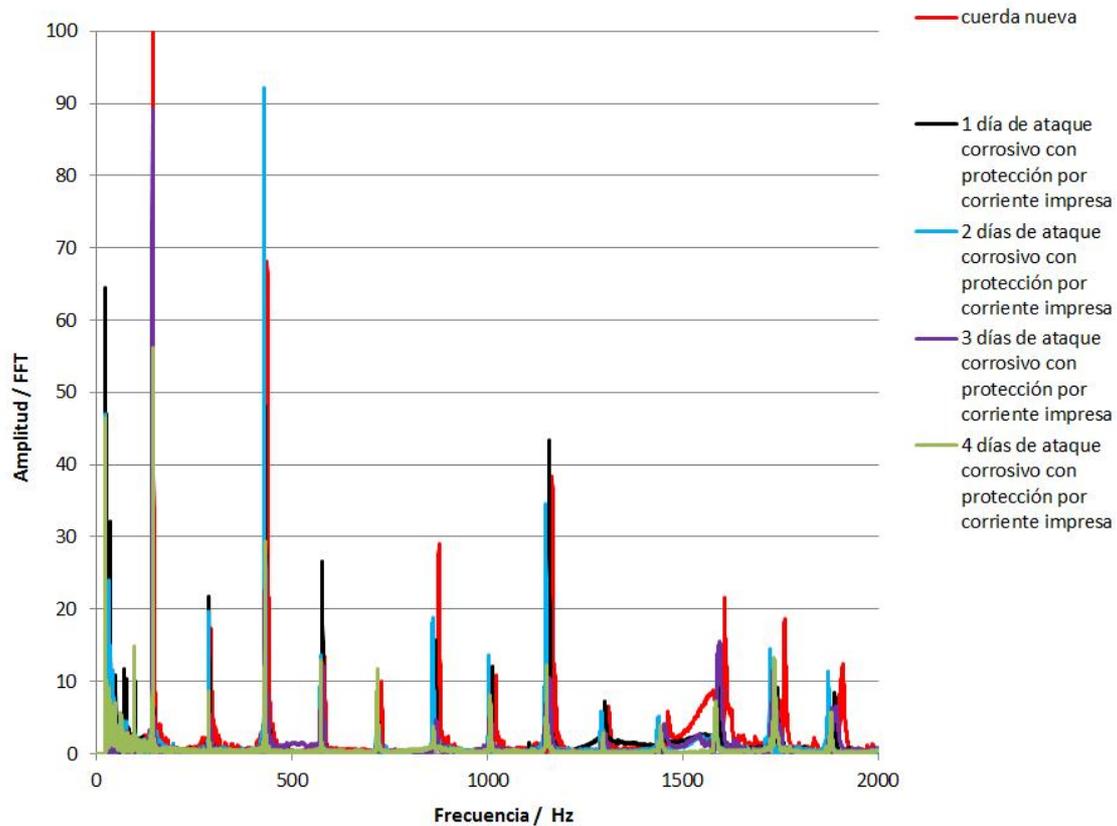


Fig. 70.b. Análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético: (b) representación gráfica de los espectros superpuestos de cuatro días de ataque corrosivo de una cuerda protegida catódicamente mediante corriente impresa.

Tal como ya fue comprobado experimentalmente durante la etapa de caracterización, nuevamente y como cabía esperar, las frecuencias [20,30,35] de los modos de vibración obtenidos experimentalmente son coincidentes con los valores teóricos obtenidos a partir de la ecuación (17) del apartado 2.3.3 que proporciona las frecuencias características de la vibración de una cuerda sujeta en sus dos extremos.

En color rojo se presenta el análisis de espectro (amplitud vs frecuencia) correspondiente a la señal de audio obtenida a partir de una cuerda nueva con antelación al proceso corrosivo.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Con una simple apreciación visual, comparando las figuras 70.a y 70.b, es evidente que en la cuerda sin protección el modo de vibración fundamental a 147 Hz, al tercer día de ataque corrosivo la señal ha perdido prácticamente la mitad de su amplitud, y que finalmente, al cuarto día del proceso tan sólo persiste un tercio del valor inicial de la amplitud.

Sin embargo, la eficacia de la protección catódica por corriente impresa se pone de manifiesto al comprobar que, al tercer día de ataque corrosivo, el modo de vibración fundamental a 147 Hz, persiste en un 90 % de su amplitud, y que finalmente al cuarto día se se sigue manteniendo por encima del 50 %.

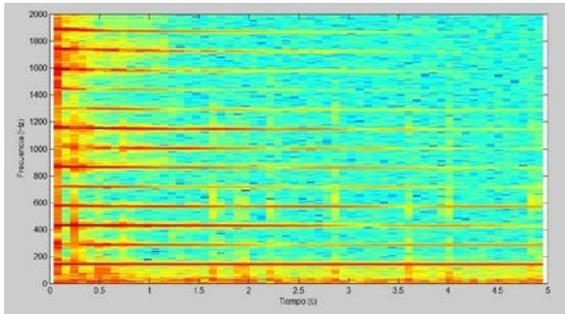
El efecto de la protección es muy notable también en el tercer modo de vibración a 441 Hz y para el cuarto modo a 588 Hz aún resulta destacable, en lo correspondiente a los modos de vibración superiores a 500 Hz, no es apreciable la diferencia entre los dos conjuntos de espectros acumulados.

La figura 71.a presenta el espectrograma inicial, que constituye la respuesta frecuencia-tiempo de una cuerda antes de iniciar el tratamiento de sudor sintético. El conjunto de espectrogramas evidencia que el modo de vibración fundamental a 147 Hz es el de mayor duración.

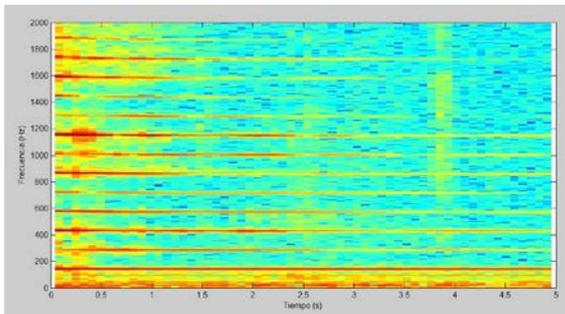
# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

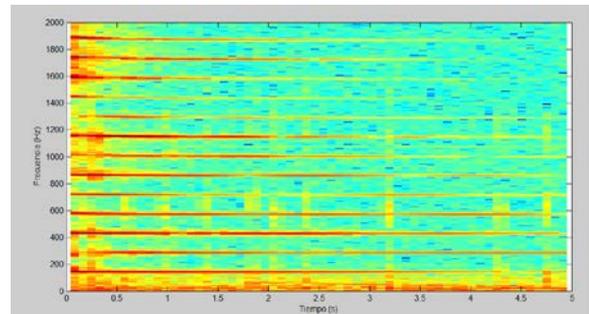
**a**



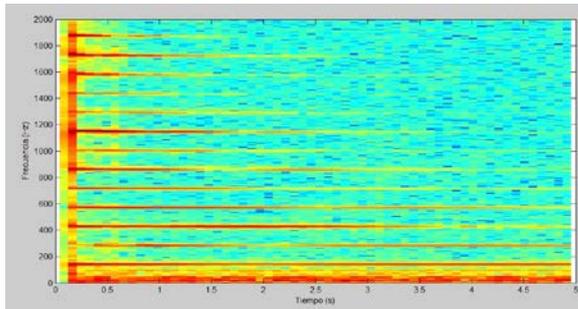
**b**



**c**



**d**



**e**

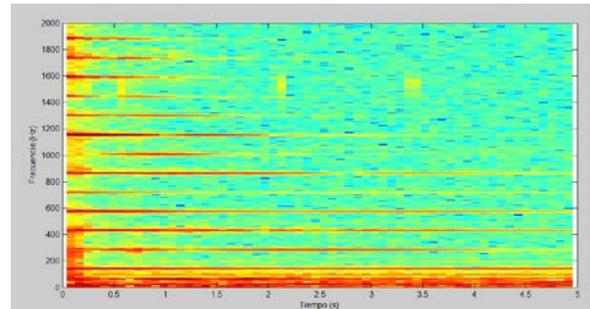


Fig. 71. Espectrogramas de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético: (a) espectrograma de una cuerda nueva. (b y c) espectrogramas al cabo de 24 horas, b) cuerda sin protección, c) cuerda protegida catódicamente por corriente impresa. (d y e) espectrogramas al cabo de 48 horas, d) cuerda sin protección, e) cuerda protegida catódicamente por corriente impresa.

Las figuras 71.b y 71.c muestran, aunque de forma sutil, que a las 24 horas de ataque corrosivo es notable el efecto de la protección catódica por corriente impresa, ya que se mantiene la amplitud del conjunto de los modos

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

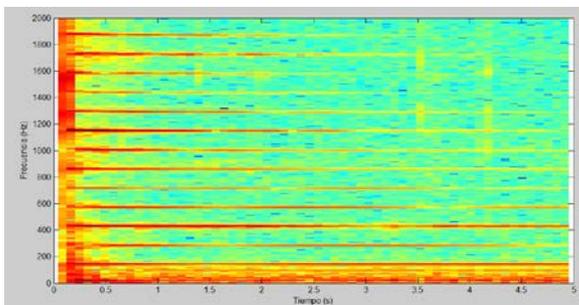
Influencia en el comportamiento acústico.

---

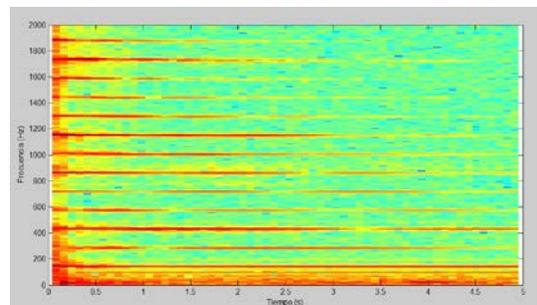
de vibración sin alteración. En una cuerda protegida todavía no es apreciable el decaimiento de la señal con el avance de la actividad corrosiva.

A partir de la figura 71.d, resulta difícil obtener información de los espectrogramas. Finalmente, las figuras 72.h y 72.i, obtenidas experimentalmente a lo largo de 96 horas de exposición a la disolución corrosiva ponen de manifiesto los efectos de la protección catódica, sobre todo en los modos de vibración correspondientes a frecuencias de orden superior.

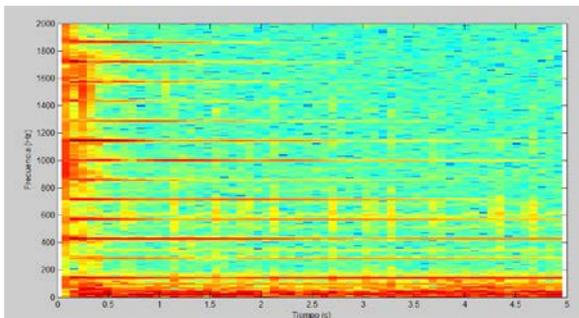
**f**



**g**



**h**



**i**

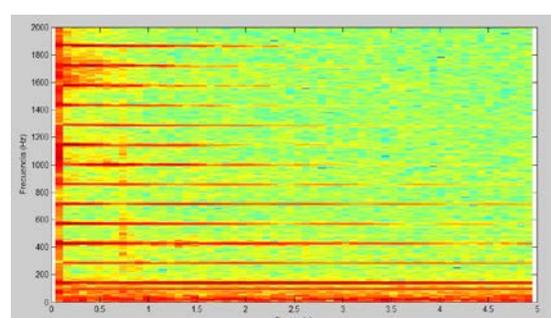


Fig. 72. Espectrogramas de una cuerda D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético: (f y g) espectrogramas al cabo de 48 horas, f) cuerda sin protección, g) cuerda protegida catódicamente por corriente impresa. (h e i) espectrogramas al cabo de 96 horas, h) cuerda sin protección, i) cuerda protegida catódicamente por corriente impresa.

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

## h) Análisis psicoacústico

Al iniciar este apartado, es importante destacar que como consecuencia de los notablemente mejores resultados obtenidos mediante el sistema de protección catódica por corriente impresa, el análisis psicoacústico se ha limitado a contrastar los resultados obtenidos entre las cuerdas protegidas mediante corriente impresa y aquellas que no han sido protegidas en modo alguno.

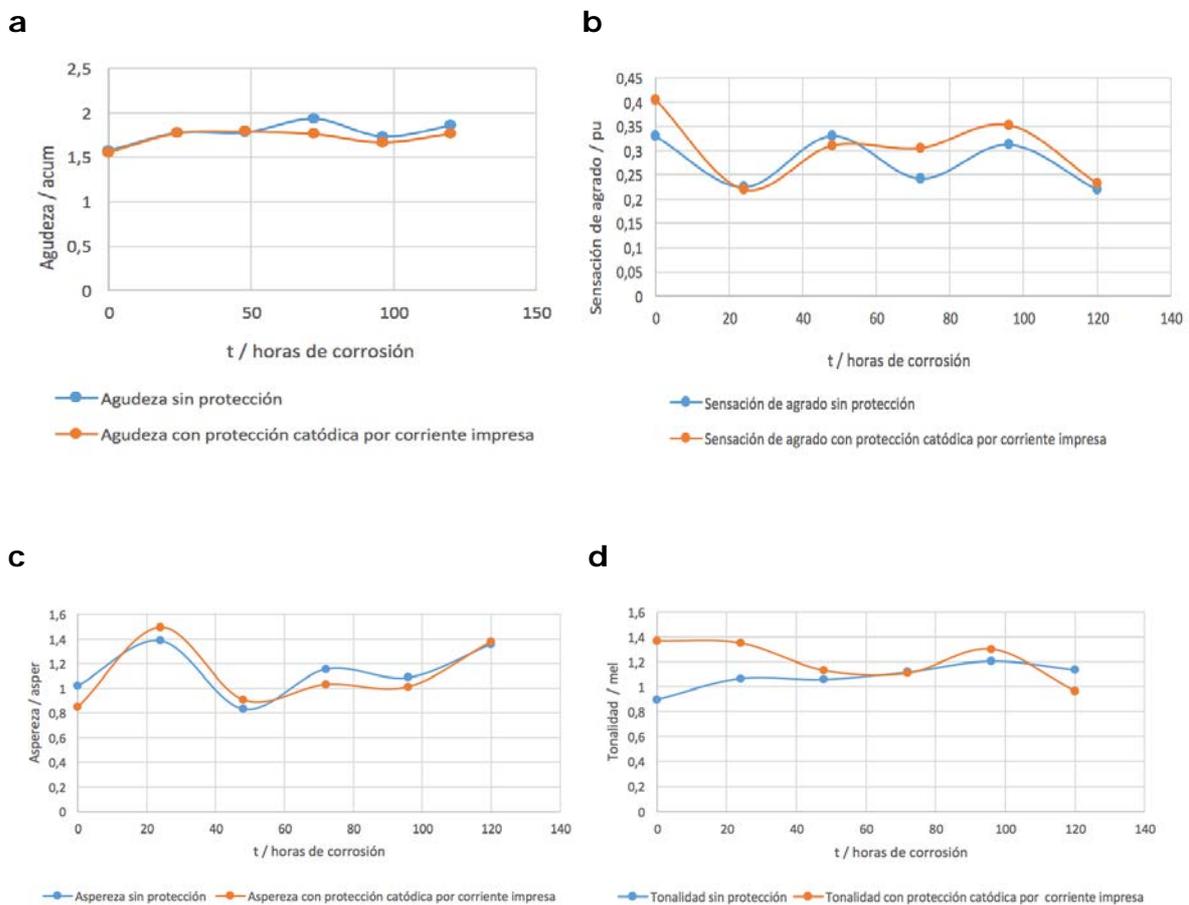


Fig. 73. Análisis de los parámetros psicoacústicos de cuerdas D4 NW026 D´Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético, cuerdas protegidas en rojo, cuerdas sin protección en azul: (a) Agudeza, (b) Sensación de agrado, (c) Aspereza, (d) Tonalidad.

Así pues, el análisis sutil de los parámetros psicoacústicos indicaría, que entre las primeras 50 y 100 horas del proceso de corrosión de las cuerdas

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

sometidas al efecto del sudor sintético, los resultados apuntan en el mismo sentido que los estudios realizados por Moore, [23,25] en los que el factor de la agudeza contribuye a la sensación de desagrado auditivo.

En este intervalo de tiempo, se puede afirmar que las cuerdas protegidas catódicamente resultan de sensación auditiva (Fig.73 b) más agradable (mejor sensación de agrado) que sus homólogas privadas de protección, lo que coincide con el hecho de que las mismas cuerdas sometidas al efecto de la protección catódica, poseen una menor proporción (Fig.73 a) de altas frecuencias (menor agudeza).

Asimismo, hay que constatar la correlación entre la aspereza (Fig.73 c) y la sensación de desagrado pues entre las 50 y 100 horas de ataque corrosivo, se percibe una menor aspereza en las cuerdas protegidas contra la corrosión, lo que coincide con la percepción de agrado (Fig.73 b), que es mayor en las cuerdas protegidas catódicamente en este mismo intervalo de tiempo.

Otro aspecto a considerar es el relativo a la tonalidad (Fig.73 d), hasta las 60 primeras horas de ataque corrosivo las señales obtenidas mediante protección catódica están constituidas proporcionalmente por una mayor riqueza en contenido tonal.

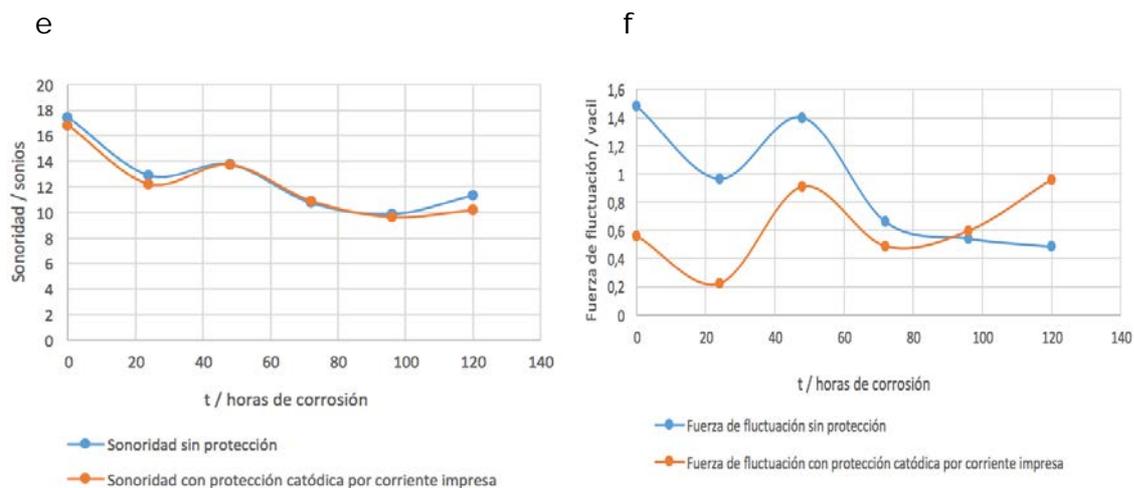


Fig. 73. Análisis de los parámetros psicoacústicos de cuerdas D4 NW026 D'Addario a lo largo del proceso de corrosión bajo el efecto de la disolución de sudor humano sintético, cuerdas protegidas en rojo, cuerdas sin protección en azul: (e) Sonoridad, (f) Fuerza de fluctuación.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Por otra parte, en sus homólogas sin protección, la presencia de ruido presente en la señal es mucho más importante.

En cuanto a la fluctuación (Fig.73. e), durante las primeras 100 horas de ataque corrosivo las cuerdas protegidas catódicamente han presentado a bajas frecuencias menos fluctuaciones de energía (amplitud y frecuencia) que las cuerdas sin protección.

Así pues, y considerando finalmente que la variación de la sonoridad (Fig.73 f) entre cuerdas protegidas y sin protección no resulta significativo, queda constancia de que entre las 50 y 100 primeras horas del ataque corrosivo, las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa proporcionan los mejores resultados y, por lo tanto, la mejor percepción subjetiva de las cualidades acústicas de la cuerda.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

# **Capítulo 5. Conclusiones generales**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 5. Conclusiones generales

En primer lugar, en la fase de caracterización electroquímica y vibro-acústica de las cuerdas se ha establecido la correlación que existe entre el grado de deterioro de las cuerdas debido a la corrosión y la correspondiente modificación de las cualidades del sonido emitido por las cuerdas corroídas al vibrar, los resultados evidencian la progresiva desaparición de los modos de vibración de orden superior. Así mismo, en los espectrogramas se hace patente la disminución de la permanencia en el tiempo de la señal acústica a medida que avanza el proceso de corrosión controlada.

Así mismo, no se advierte una significativa pérdida de masa de las cuerdas a lo largo de las primeras 72 horas del proceso corrosivo.

Por el contrario, los valores obtenidos en el análisis de la resistencia de polarización ( $R_p$ ) en medio de la disolución de sudor humano sintetizado han disminuido drásticamente (un orden de magnitud).

Así pues, es un hecho a considerar, que las medidas de  $R_p$  constituyen un método eficaz para controlar las características acústicas de las cuerdas durante los procesos de corrosión.

Como conclusión, puede afirmarse que los métodos electroquímicos basados en procesos de corrosión controlada pueden ser aplicados en la evaluación de los cambios del comportamiento acústico de las cuerdas de los instrumentos musicales.

En segundo lugar, los resultados obtenidos durante el proceso de protección catódica, han dejado clara constancia de que el método de protección por corriente impresa resulta de mayor eficacia que el método basado en la protección por ánodo de sacrificio.

La información obtenida mediante el análisis de la resistencia de polarización, manifiesta que el efecto de la protección por corriente impresa perdura más allá de las 96 horas de ensayo bajo corrosión controlada, por el contrario, la protección por ánodo de sacrificio resulta ineficaz apenas sobrepasada la barrera de los dos días de ensayo.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

Así mismo, los resultados obtenidos mediante el análisis Tafel, manifiestan que, al término de 96 horas de ataque corrosivo, en una cuerda D4 NW026 D'Addario que ha sido privada de protección, la magnitud final de  $i_{corr}$  prácticamente ha duplicado el correspondiente resultado de  $i_{corr}$  obtenido en la cuerda que ha sido sometida a protección catódica por corriente impresa.

Los datos obtenidos mediante el análisis gravimétrico de la pérdida de hierro refuerzan los resultados expuestos hasta el momento, así pues, las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa, se han oxidado de promedio un 40% menos que las no tratadas. Siendo el promedio obtenido mediante el ánodo de sacrificio tan sólo de un 0,8 %.

En lo referente al análisis vibro-acústico, la naturaleza mucho menos intensa del ataque corrosivo en la fase de protección catódica ha tenido como consecuencia que en los espectrogramas tan solo se aprecian diferencias en el eje temporal en las primeras 24 horas del proceso corrosivo.

Por contrapartida, los gráficos amplitud-frecuencia correspondientes al conjunto de las señales de audio obtenidas a partir del proceso experimental presentan diferencias evidentes, el valor de la amplitud difiere notablemente si las cuerdas han sido protegidas catódicamente o si han carecido de protección.

En las cuerdas privadas de protección es destacable el progresivo decaimiento de la señal a medida que avanza la actividad corrosiva con el paso de los días, sin embargo, al comparar sus resultados con los datos obtenidos a partir de las cuerdas protegidas mediante corriente impresa, se aprecia la eficacia del procedimiento, pues la amplitud de los cinco primeros modos de vibración: fundamental y siguientes, en general es manifiestamente mayor.

Es destacable que el valor de la amplitud del modo de vibración fundamental a las 96 horas de ataque corrosivo sea un 40% mayor que su homólogo modo de vibración privado de protección, pues estas cifras son coherentes con las obtenidas a partir de los resultados gravimétricos correspondientes a la pérdida de hierro en las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

En la fase de inicial de la tesis, se demostró que los valores de la amplitud del modo de vibración fundamental y de los inmediatos modos consecutivos disminuían con el avance del ataque corrosivo y que mantenían una correlación directa con la resistencia de polarización ( $R_p$ ) que también disminuía.

En el proceso experimental desarrollado, la protección catódica por corriente impresa ha mantenido valores más elevados de  $R_p$ , y como consecuencia directa, se ha registrado una elevada amplitud de la señal acústica en los primeros modos de vibración.

Como conclusión global del análisis psicoacústico, queda constancia de que entre las 50 y 100 primeras horas de ataque corrosivo, las cuerdas protegidas catódicamente por corriente impresa proporcionan los mejores resultados y, por lo tanto, la mejor percepción subjetiva de las cualidades acústicas de las cuerdas. Aunque por otra parte y desde un punto de vista electroquímico, al final de este estadio el avance del proceso corrosivo ya es apreciable.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Capítulo 6. Líneas futuras**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### 6.Líneas futuras

1. Desarrollar un prototipo de guitarra eléctrica que incorpore un sistema de protección catódica por corriente impresa que preserve la salud de las cuerdas así como de los herrajes y dispositivos metálicos propios del instrumento.

Con el paso del tiempo también se corroen otras piezas metálicas de la guitarra: las cubiertas de los fonocaptos, los potenciómetros, los puentes, las clavijas y herrajes. En definitiva, todos los componentes metálicos que permanecen en su uso cotidiano en contacto con el sudor del músico, y que permanecen también expuestos a las condiciones corrosivas propias del medio ambiente en que se usan, y que en algunos casos resultan muy agresivas.

Así pues, sería conveniente desarrollar un sistema de protección catódica que cubriera [13-16] la protección total de los elementos metálicos del instrumento musical.

Con este fin, debería tenerse en cuenta la naturaleza de los distintos elementos metálicos del instrumento que permanecen en contacto directo.

En lo referente a la diferencia de potenciales electroquímicos, debería observarse la relación proporcional de las áreas de dichos elementos en contacto, procurando mantener una relación favorable anticorrosión, así pues los elementos metálicos con comportamiento anódico deberían ser diseñados e incorporados al instrumento musical de forma que su área fuera superior al área correspondiente a la pieza metálica que tuviera en contacto directo y cuyo comportamiento fuera catódico con respecto a la anterior.

Esta medida debería ser considerada, si se pretende conseguir una protección catódica que protegiera la totalidad de los elementos metálicos del instrumento musical.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

2. El campo magnético generado por los núcleos ferromagnéticos bobinados de la guitarra eléctrica, provoca que por la acción de su campo eléctrico asociado [51], las cuerdas de acero estén sometidas al efecto de distintas líneas equipotenciales. Como consecuencia, las cuerdas muestran diferentes valores de potencial en distintas regiones de su superficie, lo que podría propiciar la aparición de pilas de corrosión en las mismas. Será objeto de estudio, la caracterización de este fenómeno y en su caso la implementación de posibles métodos para combatirlo.
3. Las diferencias en la caracterización del sonido que se observan en un proceso de corrosión, podrían aplicarse en un sistema que detectara de forma preventiva el estado de salud de los materiales.
4. Con objeto aumentar la aplicabilidad directa de los resultados obtenidos, se llevará a cabo el análisis completo de cuerdas con núcleo de acero y sin arrollamiento, siguiendo la misma metodología experimental.

## **Referencias**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## Referencias

- [1] Franz Jahnel, Manual of guitar technology: The history and technology of plucked string instruments, Das musikinstrument, Frankfurt am Main, 1981.
- [2] I. Rezić , L.Ćurković, M. Ujević, Metal ion release from electric guitar strings in artificial sweat, Corros. Sci. 51 (2009) 1985–1989.
- [3] T. Rolich, I. Rezić, L.Ćurković, Estimation of steel guitar strings corrosion by artificial neural network, Corros. Sci. 52 (2010) 996–1002.
- [4] I. Rezić, L.Ćurković, M.Ujević , Study of microstructure and corrosion kinetic of steel guitar strings in artificial sweat solution, Mater. Corros. 61 (2010) 524–529.
- [5] T. Gambichler, A. Uzum, S. Boms, P. Altmeyer, E. Altenmuller, Contact Dermatitis 2008, 58, 217.
- [6] M. Onder, A. B. Aksakal, M.O. Oztas, M.A. Gurer, Int. J.Dermatol. 1999, 38, 192.
- [7] D. Baccouche, M. Mokni, A.B. Abdelaziz, A.B. OsmanDhari, Ann. Dermatol. V.enereol. 2007, 134,445.
- [8] T. Gambichler, A. Uzun, S. Boms, M. Freitag, BMC Dermatol. 2004, 4,3.
- [9] B. M. Haussen, U. Noster, Contact dermatitis 1988, 14, 244.
- [10] British Standard BS EN, 1811, 1999.
- [11] H.G. de Dayan y A. Behar. Comments on "The quality of strings for guitars: an experimental study". Journal of sound and vibration (1979 64(3), 421-431
- [12] R.J. Hanson. Comments on "The quality of strings for guitars: an experimental study". Journal of sound and vibration (1983 90(2), 283-285

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

[13] Enrique Otero Huerta, Corrosión y degradación de materiales, Proyecto editorial: Biblioteca de químicas, Editorial Síntesis S.A., Madrid 2012.

[14] William F. Smith, Principles of materials science and engineering, McGraw-Hill, Madrid 1998, pp. 622-623.

[15] Marcel Pourbaix, Lecciones de corrosión electroquímica, Instituto español de corrosión y protección, Claudio Coello 20, 28001 Madrid, 1987.

[16] Mars G. Fontana, Corrosion engineering, McGraw-Hill, New York, 1987.

[17] Princeton Applied. Research Application note AC-1 "Basic Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)".

[18] J.A. González Fernández, Corrosion Control: Study and Measures by Electrochemical Techniques, CSIC-CENIM, Madrid 1989, p. 202.

[19] J.R. Macdonald, W.B. Johnson, in: J.R. Macdonald (Ed.), Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems, Wiley, New York 1987, p. 1.

[20] Frank S. Crawford, JR; Ondas; Ed. Berkeley physics course (volum 3) (1994)

[21] Franz Jahnel, The acoustic principles of music, in: Manual of guitar technology: The history and technology of plucked string instruments, Das musikinstrument, Frankfurt am Main, 1981, pp. 125-132.

[22] González, A., Ferrer, M., De Diego, M., Pinero, G., y García-Bonito, J. J., Sound quality of low-frequency and car engine noises after active noise control, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 265 (3), 663–679.

[23] Fastl, H., Zwicker, E., Psychoacoustics: Facts and models (Vol. 22), Springer Science & Business Media, 2007.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

- [24] Schiffman, Harvey, *La percepción sensorial*, Limusa Willey, 1986, p.103.
- [25] Moore, B. C., *Blackwell Handbook of Sensation and Perception: Pitch and Timbre*, E. Bruce Godstein, Blackwell Publishing, 2004, pp. 408– 439.
- [26] von Bismarck, G., *Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds*, *Acta Acustica united with Acustica*, 1974), 30 (3), pp.159–172.
- [27] Terhardt, E., Stoll, G., y Seewann, M., *Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1982, 71 (3), pp. 679–688.
- [28] Genuit, K., *The sound quality of vehicle interior noise: a challenge for the NVH- engineers*, *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2004, 1 (1-2), pp.158– 168.
- [29] García, J. J., Iturbe, J., y Planas, J. L., *Exhausta Noise Design based on Psycho-acoustic Parameters*, *FISITA World Automotive Congress*, 2000, Recuperado a partir de <http://210.101.116.115/fisita/pdf/H208.pdf>
- [30] John S. Rigden, *Physics and the sound of music*, John Wiley and sons, USA, 1977.
- [31] Martin Koch, *Building electric guitars: Hardware*, Published by Martin Koch, Gleisdorf, Austria, 2001.
- [32] James C Donahue, *Guitars: Design, production and repair*, Noah James Publishing, Po Box 1695, Bensalem PA, 2002.
- [33] Tony Bacon, *The ultimate guitar book*, Dorling and Kinderseley limited, London, 1991.
- [34] N, Olson. *Acoustic Properties of Anechoic Chamber*. *Journal Acoustical Society of America*, 1961, Volumen 33, n°6, pp 767-770.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

[35] Leo L. Beranek and Harvey P. Sleeper, Jr. *The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers*. Journal Acoustical Society of America, 1946, Volumen 18, n°1, pp140-150.

[36] F. Mansfeld, Simultaneous determination of instantaneous corrosion rate and Tafel slopes from polarisation resistance measurements, *Electrochem. Soc.* 120 (1973) 515 – 518.

[37] José Luis López, José Bonastre, Jorge Gabriel Segura, José María Gadea, Ernesto Juliá, Francisco Cases, Correlations between acoustic and electrochemical measurements for metallic corrosion on steel strings used in guitars, *Engineering Failure Analysis*, 57 (2015) 270 – 281.

[38] Beranek, Leo L.: "Acoustics". American Institute of Physics (Acoustical Society of America). Cambridge, USA, 1986.

[39] L. Reclaru, R. Ziegenhagen, P.Y. Eschler, A. Blatter, J. Lemaitre, Comparative corrosion study of "Ni-free" austenitic stainless steels in view of medical applications, *Acta Biomater.* 2 (2006) 433 – 444.

[40] Bio-logic Science instruments, Atlas of electrochemical Nyquist diagrams. A guide to equivalent circuits, September 28, 2011.

[41] Impedance Spectroscopy; Theory, Experiment, and Applications, 2nd ed., E. Barsoukov, J.R. Macdonald, eds., Wiley Interscience Publications, 2005.

[42] Electrochemical Methods; Fundamentals and Applications, A.J. Bard, L.R. Faulkner, Wiley Interscience Publications 2000.

[43] Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation, J.R. Scully, D.C. Silverman, and M.W. Kendig, editors, ASTM, 1993.

[44] Physical Chemistry, P.W. Atkins, Oxford University Press, 1990.

[45] Signals and Systems, A.V. Oppenheim and A.S. Willsky, Prentice-Hall, 1983.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

[46] Comprehensive Treatise of Electrochemistry; Volume 9 Electrodeics: Experimental Techniques; E. Yeager, J.O'M. Bockris, B.E. Conway, S. Sarangapani, Chapter 4 "AC Techniques", M. Sluyters-Rehbach, J.H. Sluyters, Plenum Press, 1984.

[47] Walter, G.W., "A Review of Impedance Plot Methods Used for Corrosion Performance Analysis of Painted Metals", Corrosion Science, 26 (1986) 681.

[48] Kendig, M., J. Scully, "Basic Aspects of Electrochemical Impedance Application for the Life Prediction of Organic Coatings on Metals", Corrosion, 46 (1990) 22.

[49] Fletcher, S., "Tables of Degenerate Electrical Networks for Use in the Equivalent-Circuit Analysis of Electrochemical Systems", J. Electrochem. Soc., 141 (1994) 1823.

[50] Mansfeld, F., "Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) as a New Tool for Investigation Methods of Corrosion Protection", Electrochimica Acta, 35 (1990), 1533.

[51] John D. Kraus, Electromagnetics, McGraw-Hill, Mexico, 1986.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

# Anexo 1

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### Anexo 1. Fundamentos de las cámaras anecoicas

Una cámara anecoica es una sala especialmente diseñada para absorber el sonido que incide sobre las paredes, el suelo y el techo de la misma cámara, anulando los efectos de eco y reverberación del sonido, es decir, simula condiciones de campo libre [1]. Actualmente, se denomina cámara *semianecoica*, al recinto que posee una de sus caras interiores reflejantes (habitualmente el piso) y el resto absorbente. Este tipo de recintos establece un campo energético con características específicas adecuado en ocasiones para el estudio de diferentes tipos de fuentes [2].

El sonido es en realidad una onda que transmite energía mecánica a través de un medio material como un gas, un líquido o un objeto sólido. De este modo, cuando una onda de sonido incide sobre una superficie se da un efecto de reflexión, que devuelve la onda sonora; y un efecto de absorción, que absorbe parte de la energía mecánica de la onda tras el impacto contra la superficie en cuestión.

En la naturaleza se da este fenómeno en todo entorno, salvo en el vacío, donde el sonido no se puede transmitir. En cualquier medio por el que el sonido se propague, se dan la reflexión y la absorción y como fruto de ellas se dan los efectos de reverberación y eco. La sala anecoica está diseñada para reducir, en la medida de lo posible, la reflexión del sonido.

La cámara anecoica ideal es un recinto totalmente libre de reverberaciones acústicas. Cualquier sonido proyectado dentro del recinto, a cualquier frecuencia, es completamente absorbido.

Por supuesto, ninguna cámara anecoica es perfecta. Es útil construir un recinto tan grande como sea posible: la ley del inverso del cuadrado dicta que la energía sonora se disipará, de manera que cada metro cuadrado de la superficie interna tendrá menos energía que absorber. Recíprocamente, un recinto más pequeño requerirá mayor o mejor absorción del sonido para obtener el mismo efecto. Esto es particularmente cierto para las bajas frecuencias, es por ello que las cámaras más pequeñas solamente tendrán una absorción efectiva hasta un límite inferior de quizás 100 Hz más o menos. La efectividad de la cámara anecoica se mide en dB de rechazo. (La relación

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

entre el sonido directo y el sonido reflejado dentro de un recinto). Una cámara debería proporcionar un rechazo mayor a 80 dB entre 80 Hz y 20 KHz, lo cual es excelente para una cámara de tamaño mediano.

Las cámaras anecoicas están aisladas del exterior y constan de unas paredes cubiertas con cuñas en forma de pirámide con la base apoyada sobre la pared, construidas de materiales que absorben el sonido y aumentan la dispersión del escaso sonido que no se absorbe. Entre estos materiales están la fibra de vidrio o espumas sintéticas.

Además de la ingeniería acústica, la cámara anecoica tiene multitud de aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones, utilizándose frecuentemente para simular condiciones de espacio libre al llevar a cabo la medición de parámetros involucrados en las comunicaciones móviles, como la tasa de absorción específica (SAR, Specific Absortion Rate) de las terminales móviles, o el diseño y caracterización de elementos radiantes tales como antenas y dipolos, utilizando como materiales absorbentes de las ondas electromagnéticas.

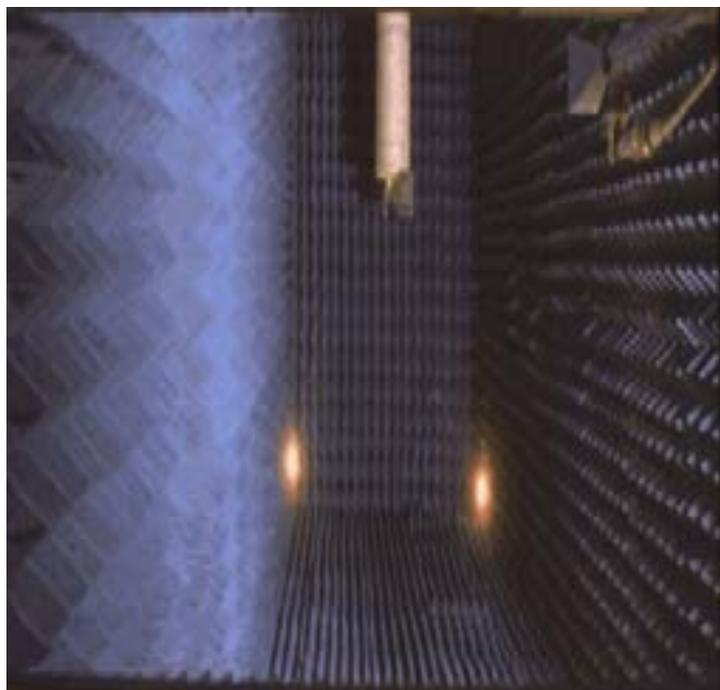


Fig. 69. Cámara anecoica.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### REFERENCIAS DEL ANEXO 1

[1] N, Olson. *Acoustic Properties of Anechoic Chamber*. Journal Acoustical Society of America, Volumen 33, n°6, pp 767-770, 1961.

[2] Leo L. Beranek and Harvey P. Sleeper, Jr. *The Design and Construction of Anechoic Sound Chambers*. Journal Acoustical Society of America. Volumen 18, n°1, pp140-150, 1946.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Anexo 2**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

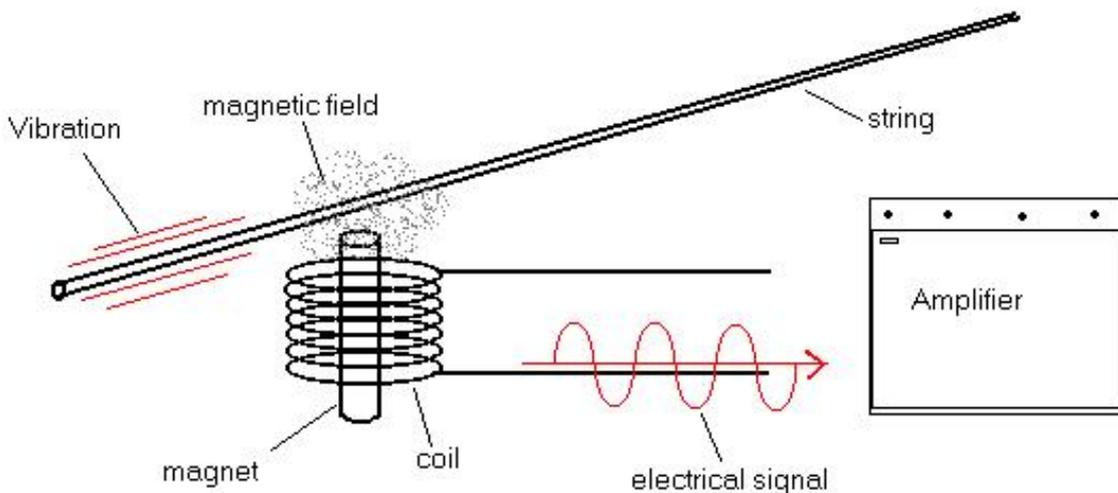
Influencia en el comportamiento acústico.

---

### Anexo 2. Aspectos relevantes de la electrónica aplicados a los instrumentos musicales de cuerda.

El sentido de añadir este anexo radica en que, desde su origen, el propósito de esta tesis es ser completada con el diseño y construcción de un sistema de protección catódica incorporado en un instrumento de cuerda eléctrico.

Los instrumentos musicales de cuerda llevan incorporados transductores de energía que transforman la energía vibrante de las cuerdas en corriente alterna. Este impulso eléctrico de corriente alterna pasan a un amplificador, el amplificador los magnifica y los pasa a un altavoz que los vuelve a convertir



en ondas de sonido.

Fig. 70. Esquema básico del funcionamiento del transductor magnético de una guitarra eléctrica.

Existen dos tipos de tipos de transductores para instrumentos de cuerda, pueden ser magnéticos o de contacto, las pastillas magnéticas o transductores magnéticos sólo funcionan si están muy cerca de las cuerdas, y por ello se montan directamente debajo de ellas.

Habitualmente se pueden ubicar entre uno y tres transductores magnéticos, esto significa que por medio de los controles de selección y volumen se puede

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

emplear cualquier combinación de los transductores para conseguir diferentes sonidos.

El transductor más cercano al centro geométrico del instrumento tiene un sonido más suave que el transductor que se coloque más alejado (cercano al puente) cuyo sonido es más agudo y cortante.

Supongamos que se hace vibrar una cuerda D4 NW026 cuyo modo fundamental de vibración se corresponde con 147 Hz, es decir 147 ciclos completos por cada segundo, la naturaleza de esta vibración determina la tonalidad del sonido.

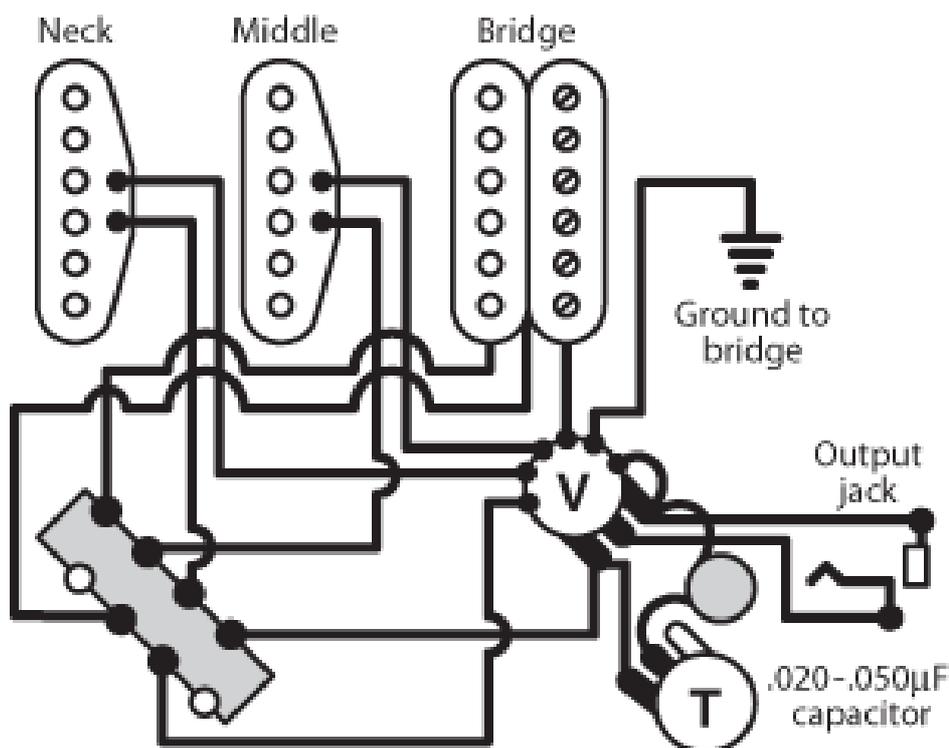


Fig. 71. Circuito electrónico formado por dos transductores single coil y un transductor PAF con anulación de ruido.

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

El volumen del sonido (su amplitud) queda determinado por la distancia a la que se encuentra la cuerda respecto a los polos magnéticos transductores que captan el sonido mientras se mantiene la vibración.

A medida que vaya transcurriendo el tiempo, la vibración irá perdiendo amplitud, se irá atenuando, no obstante, aunque el volumen vaya disminuyendo, durante todo el proceso, la naturaleza de la vibración no se alterará, seguirá siendo de 147 ciclos por segundo.

Esta forma específica en que la vibración de la cuerda se produce, alterará la naturaleza del campo magnético del imán permanente propio del transductor situado bajo la misma.

Alrededor de las piezas polares magnéticas pertenecientes a las pastillas (es habitual denominar a los transductores magnéticos con el nombre de pastillas) se arrollan unas 8000 vueltas de hilo de cobre aislado, el hilo es sumamente fino, aproximadamente como un cabello. El imán genera un campo magnético a su alrededor y la pastilla se monta de manera que las cuerdas de la guitarra pasen por dicho campo magnético, como las cuerdas son de acero interfieren con el campo.

Si están inmóviles el campo magnético mantiene su forma regular y no se produce fenómeno alguno en la bobina, pero en cuanto se pulsa una cuerda, su movimiento altera la forma del campo. Algunas de las líneas de fuerza que componen el campo magnético pasan por la bobina y cuando la vibración de las cuerdas hace que las líneas de fuerza se muevan, se generan en la bobina pequeñas pulsaciones de corriente alterna.

Si la bobina está conectada a un amplificador estas pulsaciones se transmitirán al mismo, transformándose en sonido.

Si se considera que el transductor registra 0 mV si no está excitado (cuerda quieta) cuando el mismo se excite al acercarse la cuerda al correspondiente polo magnético, registrará hasta 85 mV, asimismo registrará -85mV al alejarse del polo, estas medidas se obtienen con el norte magnético del imán permanente orientado hacia la cuerda vibrante. La naturaleza de este fenómeno obedece a la ley de Faraday-Lenz: las fuerzas electromotrices o

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

corrientes inducidas son de tal sentido que se oponen a la variación del flujo magnético que las produce.

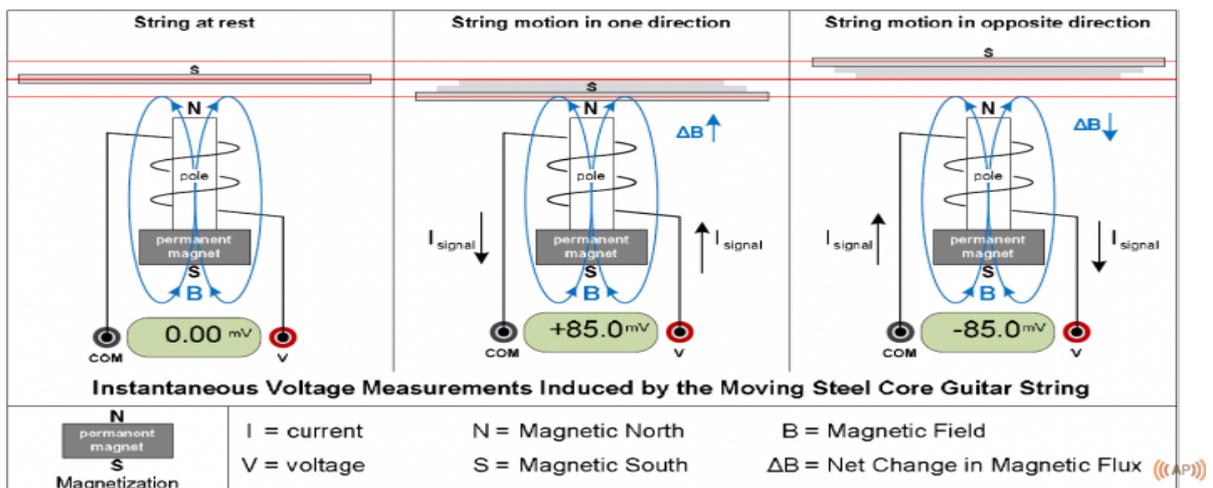


Fig. 72. De izquierda a derecha, comportamiento de los transductores en la proximidad de una cuerda en reposo, ante una cuerda vibrante al acercarse al transductor y ante una cuerda que se aleja.

La mayoría de los imanes con los que se construyen los transductores magnéticos se hacen de alnico pero algunos fabricantes emplean imanes cerámicos o piezoeléctricos, la forma del imán varía según el diseño de la pastilla.

La forma básica de barra puede tener una aleta que prolonga un polo del campo magnético acercándolo más a las cuerdas, puede tener seis varillas o imanes individuales, una para cada cuerda y se puede alterar la altura de cada una de ellas.

Cuanto más potente sea el imán más fuerte será el sonido amplificado, sin embargo, un imán demasiado potente impide el libre movimiento de las cuerdas al vibrar creando pérdida de nivel de sostenimiento y distorsión tonal. En las pastillas en las que el número de espiras del devanado de cobre es muy elevado, el hilo es muy fino y por tanto su resistencia óhmica muy alta, así la claridad y el brillo del sonido se reducen, sin embargo el volumen de salida del instrumento musical es más alto, es el caso habitual de las pastillas P.A.F. cuyo sonido es oscuro, grueso y potente, las pastillas Lipstick o single

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

coils con un menor número de vueltas de cobre y por tanto una mayor sección del cable en las espiras de cobre (menor resistencia óhmica) producen un menor nivel de señal de salida pero su sonido es mucho más claro y brillante, en general la tensión nominal de las pastillas oscila entre 100mV y 1 V RMS. Por último, el valor de la inductancia es muy influyente en el sonido, la mayor capacidad de almacenamiento de energía en el campo magnético producirá una mayor señal de salida, más volumen y un sonido más oscuro. La frecuencia de pico, más allá de la cual la señal de salida caerá completamente para el resto de frecuencias superiores a la misma, es fundamental para determinar el color del sonido, cuanto mayor sea la frecuencia de pico más brillante será el sonido.

### REFERENCIAS DEL ANEXO 2

**Tom Wheeler**, The guitar book: a handbook for electric and acoustic guitars, revised and enlarged edition, Harper and Row publishers, 1978.

**Franz Jahnelt**, Manual of guitar technology: The history and technology of plucked string instruments, Das musikinstrument, Frankfurt am Main, 1981.

**Franz Jahnelt**, The acoustic principles of music, in: Manual of guitar technology: The history and technology of plucked string instruments, Das musikinstrument, Frankfurt am Main, 1981, pp. 125-132.

**Martin Koch**, Building electric guitars: Hardware, Published by Martin Koch, Gleisdorf, Austria, 2001.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

**Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Contribuciones a congresos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

### **Autores:**

José Luis López<sup>a</sup>; José Bonastre<sup>a</sup>; Jorge Gabriel Segura<sup>b</sup>; José María Gadea<sup>b</sup>; Ernesto Juliá<sup>b</sup>; Francisco Cases<sup>a</sup>

a) Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain

b) Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain

### **Título:**

Efectos de la corrosión metálica en el comportamiento acústico de las cuerdas de acero de la guitarra.

### **Tipo de participación:**

Comunicación oral.

Congreso: IV Congreso I+D+i. "**Creando Sinergias**"

Publicación: Libro de resúmenes IV Congreso I+D+i. "**Creando Sinergias**".

Edita: Compobell, S.L. ISBN: 978-84-945433-4-0

Depósito legal: MU 1389-2016

21-24 págs.

Lugar de celebración: Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Fecha: 13 de Julio de 2016.

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Publicaciones o documentos científico-técnicos**

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---

# Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.

Influencia en el comportamiento acústico.

---

## **Autores:**

José Luis López<sup>a</sup>; José Bonastre<sup>a</sup>; Jorge Gabriel Segura<sup>b</sup>; José María Gadea<sup>b</sup>; Ernesto Juliá<sup>b</sup>; Francisco Cases<sup>a</sup>

a) Departamento de Ingeniería Textil y Papelera, Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain

b) Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy, Spain

## **Título:**

Correlations between acoustic and electrochemical measurements for metallic corrosion on steel strings used in guitars.

Revista: Engineering Failure Analysis

Número: 57 (2015)

Páginas: 270 – 281      Fecha: 07/08/2015

Editorial: Elsevier

## **Corrosión de cuerdas de instrumentos musicales.**

Influencia en el comportamiento acústico.

---