



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN**

**COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

**DETECCIÓN Y ESTUDIOS NO
DESTRUCTIVOS DE LA
FISURACIÓN DE CUADROS
DE BICICLETA**

Matías A. Giorgetti

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
"Prof. Jorge A. Sabato"

Detección y estudios no destructivos de la fisuración de cuadros de bicicleta (*)

Por Ing. Matías Giorgetti

Director

Dra. Marta C. Ruch

(*) Tesis para optar al título de *Magíster en Ciencias y Tecnología de Materiales*

República Argentina

2012



Resumen

El método de corrientes inducidas (CI) es uno de un conjunto de métodos conocidos como ensayos no destructivos (END). Efectuar un ensayo no destructivo consiste en examinar un objeto mediante una técnica que no altere su futura utilidad, con el objeto de detectar, localizar, medir y evaluar posibles defectos, determinar integridad, propiedades y composición, y medir características geométricas.

En este trabajo se presenta el desarrollo de sensores para corrientes inducidas para el ensayo de cuadros de "bicicleta de montaña" (mountain bike) construidos con tubos de aleación Al-7005, con el objeto de poner a punto una técnica específica para ensayar estos cuadros en bicicletas de alta calidad, en distintas etapas de montaje y/o comercialización.

Se utilizó un equipo para corrientes inducidas basado en PC, bobinas planas montadas en soportes especialmente diseñados y, para la calibración, un tubo patrón con defectos artificiales. También se utilizaron bobinas tipo palpador, para realizar una comparación entre los diferentes tipos de sensores.

Los cuadros ensayados habían sido descartados tras seis meses de uso (no se conoce la distancia recorrida) debido a la aparición de fisuras en el tubo de dirección donde se insertan stem y horquilla. Ambos tienen número de serie y uno de ellos, además, el sello de conformidad con la norma europea EN 14766.

En el examen visual previo a la aplicación del método de corrientes inducidas, se observó que uno de los cuadros presentaba una fisura en el tubo de dirección en la zona donde calza la horquilla, en una región de cambio de diámetro. El otro presentaba varias fisuras en la zona donde calza el stem y en una región entre dos cordones de soldadura donde calza el sillín. En la primera zona se observa un cambio de diámetro, una parte cónica y dos cordones de soldadura.

Abstract

Eddy current testing (ET) is one of the many methods used in Non Destructive Testing (NDT). NDT is the development and application of technical methods to examine materials or components in ways that do not impair future usefulness and serviceability in order to detect, locate, measure and evaluate flaws; to assess integrity, properties and composition; and to measure geometric characteristics.

The object of this work is to develop sensors for eddy current testing of mountain bike frames, made of Al-7005 alloy tubes, with a specific technique for the inspection of those frames in high end bicycles, in different stages of assembly or marketing.

A PC-based eddy current equipment is used, different types of surface coils, namely planar rectangular spiral and pancake coils, are used and their performance compared. Specially designed coil holders were built. Artificial defects were made on an Al-7005 tube, which was used as calibration standard.

The tested frames had been removed after six months' use (the distance travelled is not known) due to axial cracks appearing on the head tube, where handlebar stem and front fork are inserted. Both frames have serial numbers, and one of them also has the European standard EN 14766 conformity mark.

In the visual exam, before the application of the eddy current test, the author of this work observed that one of the frames presented one crack in the head tube, in the front fork insertion, that is a change of diameter zone. The other one had cracks in the zone where the stem insertion, and in the seat post, between two welded beads. In the first zone, a change of diameter, a conical part and two welding beads are observed.

Contenido

Contenido	4
1. Introducción	5
1.1 Normativa aplicable	5
1.2 Aleaciones de Aluminio	6
1.2.1 Tratamientos Térmicos	9
1.2.2 Tipos de aleaciones utilizadas en cuadros de bicicleta	11
1.3. Materiales y antecedentes	13
2. Fabricación de cuadros de bicicleta	15
2.1 Extrusión de tubos de aluminio	15
2.1.1 Defectos en extrudidos	18
2.1.2 Condiciones generales ²¹	19
2.2. Hidroformado: Aplicación para cuadros de bicicletas	22
2.3. Las zonas a estudiar	24
3. Ensayos no destructivos	25
3.1 Corrientes Inducidas	25
3.1.1 Plano de Impedancia	29
3.1.2 Sondas	30
3.1.2.1 Sondas utilizadas	31
3.1.2.1.1 Bobina Zetec®	32
3.1.2.1.2 Bobina Plana	35
3.1.2.1.3 Bobina Tipo Panqueque (Pancake coils)	39
3.1.3 Equipos utilizados	43
3.1.4 Diseño y construcción del dispositivo de ensayo	43
4. Resultados y discusiones	47
5. Capitulo Adicional	55
6. Conclusiones	77
Apéndice	78
Agradecimientos	130
Referencias Bibliográficas	131

1. Introducción

En el año 2007 se tuvo la oportunidad de ensayar por corrientes inducidas un cuadro de bicicleta de montaña ("mountain bike") que presentaba una fisura por fatiga en la zona del tubo de dirección donde se inserta el stem. Esta fisura había aparecido luego de un tiempo de uso y, ante el reclamo presentado al vendedor, el cuadro fue cambiado por el importador, quien a su vez otorgó garantía sobre el nuevo. Ambos cuadros estaban contruidos con tubos de aluminio de aleación 7005. El nuevo lleva ya más de 4 años en uso.

Como no se trataba de un caso aislado, se propuso estudiar otros cuadros de Mountain Bike que presentaran el mismo tipo de fisuración por fatiga y, hasta el momento, se ensayaron otros dos, de otras dos marcas diferentes, también de aluminio 7005, usados, que habían sido descartados debido a la aparición de fisuras en el tubo de dirección del cuadro, donde se insertan stem y horquilla.

El presente trabajo es parte del desarrollo de técnicas no destructivas para el estudio de cuadros de bicicleta de montaña, cuyo objetivo último es proponer una técnica para la inspección de cuadros de bicicletas de alta calidad, en distintas etapas de montaje, comercialización o uso. La motivación de este trabajo surgió a partir de un estudio previo realizado en el laboratorio¹.

1.1 Normativa aplicable

Existen cuatro normas europeas que contemplan los requisitos de prestaciones, seguridad, montaje y ensayos de los diferentes tipos de bicicletas:

EN 14764: Bicicletas de Paseo. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.²

EN 14765: Bicicletas de Niños. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.

EN 14766: Bicicletas de Montaña. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.³

EN 14781: Bicicletas de Carrera. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.

Por su parte, Argentina tiene dos normas:

IRAM 40020: Bicicletas de Paseo. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.⁴

NM 301: Bicicletas de Niños. Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.

Los requisitos de seguridad que la Unión Europea aplica a este tipo de bicicletas están reunidos en la Norma EN 14766, que especifica los métodos de ensayo y los requisitos de seguridad y prestaciones a observar durante el diseño, el montaje y los ensayos de las bicicletas de montaña.

A continuación se presenta la mención que se realiza en la EN 14766:

“4.4 Métodos de detección de fisuras

Deben utilizarse métodos normalizados para poner en evidencia la presencia de fisuras cuando la presencia de fisuras visibles está especificada como criterio de rechazo en los ensayos descritos en esta norma. Véase el apartado 3.20.

NOTA Como ejemplo, los métodos apropiados de control mediante líquidos penetrantes se especifican en la Norma ISO 3452.”³

1.2 Aleaciones de Aluminio

En la mayoría de las aplicaciones industriales no se utiliza el aluminio puro, dado que sus propiedades mecánicas (dureza y resistencia) no son muy buenas; en particular, la resistencia mecánica es bastante limitada. Justamente por esto se han desarrollado las aleaciones de aluminio, con las cuales, mediante el agregado de distintos elementos, es posible lograr propiedades adecuadas para diferentes usos. El aluminio y sus aleaciones resultan muy útiles en aplicaciones de ingeniería mecánica, por su baja densidad, 2700 kg/m^3 y su alta resistencia a la corrosión.

Los principales aleantes del aluminio son elementos tales como zinc, magnesio, cobre, silicio, etc, que se utilizan en cantidades limitadas. La adición de uno u otro elemento va a permitir mejorar distintas propiedades como resistencia, tenacidad, ductilidad, resistencia a la fatiga y a la corrosión. Mediante una aleación adecuada se puede llegar a valores de resistencia mecánica de 690 MPa.

Las aleaciones de aluminio forjado se clasifican según un sistema de 4 dígitos numéricos según “The Aluminum Association”⁵. Se agrupan a las aleaciones en 8 grupos o series, Figura 1.1. El primer dígito indica el grupo al cual pertenece la aleación, identificado por su aleante principal, como sigue:

Aluminio con un mínimo de pureza de 99%.....	1xxx
Cobre.....	2xxx
Manganeso.....	3xxx
Silicio.....	4xxx
Magnesio.....	5xxx
Silicio-Magnesio.....	6xxx
Zinc.....	7xxx
Otro elementos.....	8xxx

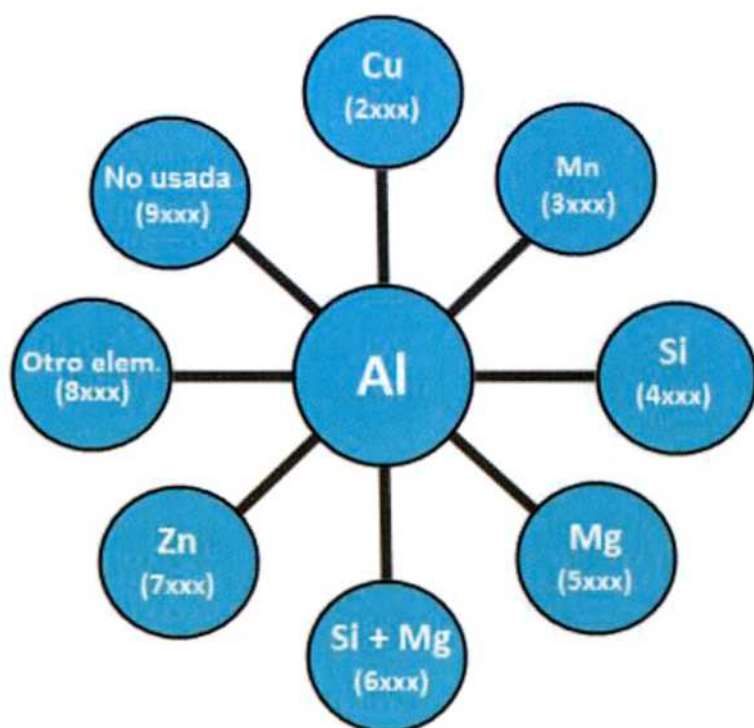


Figura 1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio.

La 1xxx es aluminio de alta pureza, con un mínimo de 99%. Estas se usan en aplicaciones en las que las características mecánicas no sean las importantes y sí otras como resistencia a la corrosión o conductividad eléctrica. Los dos últimos dígitos indican el mínimo porcentaje de aluminio.

En los grupos 2xxx a 8xxx, el segundo dígito indica si la aleación ha sido modificada. Si el segundo dígito es "0", significa que se está empleando la aleación original. Y los últimos dos, de los cuatro dígitos, sólo permiten distinguir una aleación de otra, dentro de un mismo grupo.

La 2xxx tiene como principal aleante Cu y a veces suele añadirse Mg. Las características de esta serie son: una buena relación dureza-peso y una mala resistencia a la corrosión. Para lograr la buena relación dureza-peso es necesario realizar tratamientos térmicos de solubilidad y suele hacerse un envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas. En estas condiciones, dichas propiedades pueden llegar a superar a las de un acero de bajo carbono. Para compensar la mala resistencia a la corrosión, se les realiza un galvanizado con aluminio de alta pureza o aluminio de la serie 6xxx. Tienen una mala soldabilidad pero una alta maquinabilidad y se las utiliza para aplicaciones que requieren una alta relación dureza-peso, como por ejemplo: ruedas de camiones y aviones; suspensión de camiones; fuselaje de aviones; estructuras que necesiten presentar una alta dureza a temperaturas del orden de los 150°C.

La 3xxx tiene como principal aleante Mn, logrando aproximadamente un 20% más de dureza que el aluminio puro. Esto se debe al limitado agregado de Mn, que está restringido a un 1,5%. Se utiliza en productos que necesiten de una dureza intermedia y buena maleabilidad. Empleado en: botellas de bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, muebles, señales de tránsito, etc.

La 4xxx tiene como principal aleante el Si. Utiliza cantidades del orden del 12% para, de esta manera, acercarse a la composición eutéctica y tener una aleación con bajo punto de fusión. Se lo utiliza por lo tanto como material de aporte en la soldadura de aluminio, ya que tiene un punto de fusión más bajo que el resto de las aleaciones de este metal. Esta aleación no es tratable térmicamente, pero al utilizarse como aporte en la soldadura de aleaciones de aluminio tratables térmicamente, en el conjunto, permiten que ello se pueda lograr. La aleación 4032 tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y una alta resistencia al desgaste, lo que permite su empleo en la fabricación de pistones de motor.

La 5xxx tiene como principal aleante Mg. Suele agregarse Mn para endurecer aún más el material. Las ventajas del Mg frente al Mn, son que el primero endurece más al aluminio y puede agregarse en mayores proporciones. Logra una dureza media a alta por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión y no es recomendable para trabajado en frío. Se usa en arquitectura, andamios, aplicaciones marinas e industria automotriz.

La 6xxx tiene como principales aleantes Mg y Si. Esta aleación es tratable térmicamente. Es menos resistente que las aleaciones 2xxx y 7xxx, pero esto se compensa con buenas maleabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. El tratamiento térmico más utilizado en estas aleaciones es el T6. Tiene aplicaciones en construcciones, transporte, cuadros de bicicleta, pasamanos de puentes, estructuras soldadas, etc. Pueden ser anodizadas.

La 7xxx tiene como principal aleante el Zn; sus proporciones van desde el 1 al 8%. Para que sea tratable térmicamente, se añaden pequeñas cantidades de Mg. La principal propiedad es su alta resistencia mecánica, por lo que se la utiliza en estructuras de aviones y de vehículos espaciales, cuadros de bicicleta, raquetas de tenis, bastones de esquí y partes sometidas a grandes esfuerzos. Son susceptibles a la corrosión bajo tensiones.

La 8xxx comprende aleaciones cuyo principal aleante no está incluido en ninguna de las series anteriores, y algunas aleaciones de pureza comercial basadas en Al-Fe-Si, con concentraciones demasiado altas para ser consideradas en la serie 1xxx. A la serie 8xxx pertenecen las aleaciones de Al-Li para aplicaciones espaciales y las Al-Sn para rodamientos en automóviles y camiones.⁶

Las ventajas que proporcionan cada uno de los aleantes son las siguientes:

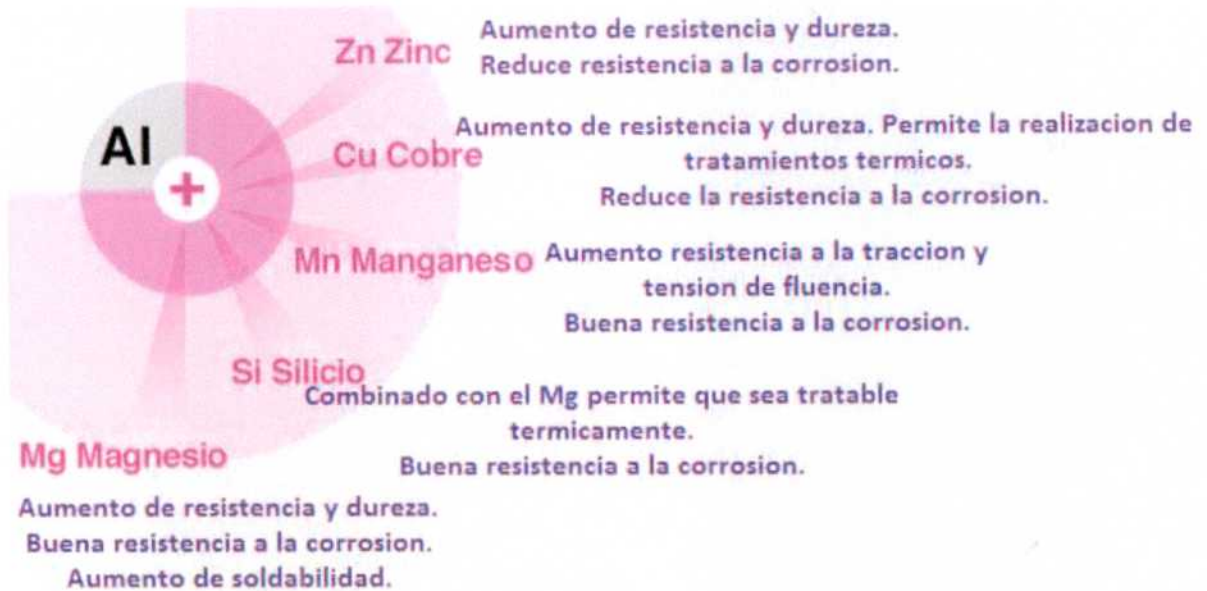


Figura 1.2 Ventaja de cada aleante de los aluminios.⁷

1.2.1 Tratamientos Térmicos

Algunas aleaciones de aluminio pueden ser tratables térmicamente. Los grupos 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx son para trabajado en frío; por lo tanto no se las puede tratar térmicamente, mientras que los grupos 2xxx, 6xxx y 7xxx son para trabajado en caliente y se las somete a tratamiento térmico.

El templeado consiste en el endurecimiento de un metal mediante un calentamiento profundo seguido de un enfriamiento brusco. Este proceso consta de dos fases: la primera (calentamiento) tiene como objeto mejorar la dureza y flexibilidad del metal modificando la estructura interna por el calor y la segunda (enfriamiento brusco) permite que el metal conserve las características previamente adquiridas, particularmente la dureza y flexibilidad.

Después de la soldadura, se busca que mediante estos tratamientos recuperen las propiedades perdidas anteriormente, ya que en la zona afectada por el calor (ZAC), la resistencia a la tracción puede ser reducida cuando hay un exceso de calor de soldadura.

Las designaciones de temple, que figuran a continuación del código de aleación, separadas por un guión, son las siguientes:

- F: material extruido sin temple, sin ningún tratamiento posterior. Aplicable a conformados tanto en frío como en caliente y fundiciones, donde no es necesario un control de las condiciones térmicas.
- O: recocido mediante tratamiento térmico. Aplicable a aleaciones forjadas que son recocidas para lograr mayor resistencia al temple y para fundiciones que son recocidas para mejorar la ductilidad y lograr mayor estabilidad dimensional. La letra "O" puede estar seguida de un número distinto de cero.

O: recocido de ablandamiento

O1: recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.

O2: sometido a tratamiento termomecánico.

O3: Homogeneizado.

- H: endurecimiento por deformación (endurecido mediante tratamiento mecánico). Sólo aplicable a aleaciones forjadas, cuya resistencia se incrementa mediante endurecimiento por deformación, con o sin tratamiento térmico posterior para disminuir un poco la resistencia. La letra "H" puede estar seguida de dos o más dígitos.

H1: endurecido por deformación únicamente.

H2: endurecido por deformación y parcialmente recocido.

H3: endurecido por deformación y estabilizado.

- W: solubilizado. Sólo aplicable a aquellas aleaciones cuya resistencia natural disminuye a lo largo del tiempo.

- T: temple obtenido por tratamiento térmico con o sin tratamiento mecánico. Aplicable a aleaciones cuya resistencia es estable luego de semanas de aplicado el tratamiento térmico. La letra "T" está seguida de uno o dos dígitos.

T1: enfriado y envejecido naturalmente.

T2: enfriado y envejecido naturalmente hasta una condición estable.

T3: solubilizado, trabajado en frío y luego envejecido naturalmente.

T4: solubilizado y envejecido naturalmente hasta una condición estable.

T5: enfriado y envejecido artificialmente.

T6: solubilizado y envejecido artificialmente.

T7: solubilizado y sobre-envejecido o estabilizado.

T8: solubilizado, trabajado en frío y envejecido artificialmente.

T9: solubilizado, envejecido artificialmente y trabajado en frío.

T10: enfriado, trabajado en frío y envejecido artificialmente.

El tratamiento térmico más común empleado en los tubos para la fabricación de cuadros de bicicleta, es el T6.⁸

Este consiste en un tratamiento térmico de solubilizado y un envejecimiento artificial.

El solubilizado consiste en calentar el material el tiempo suficiente para que la pieza llegue a una temperatura de 530°C y luego se la enfría con rapidez en agua a no más de 30 a 35°C. Tiene como objetivo homogeneizar la microestructura.

El envejecimiento artificial es la operación final, previa al pintado. Éste puede durar unas 8 horas a 175°C.

1.2.2 Tipos de aleaciones utilizadas en cuadros de bicicleta

Los materiales elegidos en la fabricación de cuadros de bicicleta son las aleaciones de aluminio 6061 y 7005, acero cromoly 4130, fibra de carbono y titanio, en menor medida. Los materiales de nuestro interés son las aleaciones de aluminio 6061 y 7005.

A continuación comparamos la composición química de estas aleaciones.

Designación			Composición química										
AA	Nro UNS	ISO	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Otro Elem.	Ti	Al Min
6061	A96061	AlMg1SiCu	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25		0,15	resto
7005	A97005	Al Zn4,5Mg1,5Mn	0,35	0,4	0,1	0,2-0,7	1-1,8	0,06-0,2	-	4,0-5,0	0,08-0,20 Zr	0,01-0,06	resto

Tabla 1.1 Composición química aleaciones 6061 y 7005.⁹

Como puede verse en la tabla anterior, el aluminio 6061 tiene como principales aleantes Mg y Si. El aluminio 7005 tiene como principales aleantes el Zn y Mg. Ambos tienen como aleantes minoritarios Fe, Cu, Mn, Cr y Ti; el 7005 tiene además Zr. En la tabla periódica, Figura 1.3, se ven los aleantes mayoritarios y minoritarios de ambos materiales en una misma tabla.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ar
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ne
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	**	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Aleante mayoritario
 Aleante minoritario

Figura 1.3 Aleantes del aluminio 6061 y 7005.¹⁰

Las propiedades de la aleación 6061, tabla 1.2 y tabla 1.3, son las siguientes:

Propiedades		
Densidad (gr/cm3)		2,7
Módulo de Elasticidad (Gpa)		68,9
Resistencia a la tracción (MPa)	O	124
	T4	241
	T6	310
Tensión de fluencia (MPa)	O	55
	T4	145
	T6	276
Temp. Liquidus (°C)		652
Temp. Solidus (°C)		582

Tabla 1.2 Propiedades físicas y mecánicas Al 6061¹¹

Temperatura (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)
-196	414	324
-80	338	290
-28	324	283
24	310	276
100	290	262
149	234	214
204	131	103
260	51	34
316	32	19
371	24	12

Tabla 1.3 Propiedades de resistencia para varias temperaturas (6061-T6)¹²

Las propiedades de la aleación 7005, tabla 1.4 y 1.5, son las siguientes:

Propiedades	
Densidad (gr/cm3)	2,78
Módulo de Elasticidad (Gpa)	71
Resistencia a la tracción (MPa)	345
Tensión de fluencia (MPa)	303
Temp. Liquidus (°C)	643
Temp. Solidus (°C)	604

Tabla 1.4 Propiedades físicas y mecánicas Al 7005¹³

Temperatura (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)
-269	641	483
-196	538	421
-80	441	379
-28	421	359
24	392	345
100	303	283
149	165	145
204	97	83

Tabla 1.5 Propiedades de resistencia para varias temperaturas (7005-T53)¹⁴

La resistencia a la tracción, una de las propiedades mecánicas consideradas en el diseño, es relativamente mayor en el aluminio 7005 por sobre el aluminio 6061. Aplicándole un T6 al 6061, podemos llegar a una resistencia de 310 MPa, mientras que si se lo aplicamos al 7005, podemos llegar a 550 MPa. Según expertos fabricantes de cuadros de bicicleta¹⁵, el Al 7005 puede llegar a ser un 10% mas resistente que el Al 6061. Este motivo no es suficiente, para que los fabricantes de cuadros de bicicleta, elijan a la aleación 7005 por sobre la aleación 6061. Justamente la aleación 6061, compensa la menor resistencia con buena maleabilidad, maquinabilidad, soldabilidad. Y en esos aspectos es superior a la aleación 7005.

También es importante destacar, que el empleo de circonio en la aleación 7005, le proporciona mayor resistencia mecánica. El circonio le da al material una estructura de grano muy fino. Esto ocurre durante la etapa de precipitación. Justamente el empleo de este elemento en la aleación 7005 proporciona lo siguiente:

- Resistencia a la tracción hasta 550 MPa.
- Aumento de la temperatura de recristalización.
- Mayor resistencia a la fisuración en caliente.¹⁶

1.3. Materiales y antecedentes

Para el trabajo en laboratorio se utilizaron dos cuadros de aleación 7005, que denominamos “cuadro 2” y “cuadro 3”. El “cuadro 2” es de aleación 7005 O8, fue fabricado por la técnica de hidroformado y tiene el sello de conformidad con la norma EN 14766. Los tubos que conforman el “triángulo delantero” no son de sección circular. Presenta varias fisuras en el tubo de dirección, en las zonas donde calzan la horquilla y el stem (Figura 1.4), donde se observa un cambio de diámetro. El “cuadro 3” es de tubo de aluminio 7005 y no tiene el sello de conformidad con la norma EN 14766. Presenta varias fisuras en la zona donde calza el stem (Figura 1.5a) y en una región entre dos cordones de soldadura donde calza el sillín (Figura 1.5b). En la primera región con fisuras, se observa un cambio de diámetro, una parte cónica y cercanía con cordones de soldadura. En un trabajo anterior¹⁷, se presentaron resultados de ensayos de corrientes inducidas efectuados con un equipo para CI modelo MAD8D de la firma Eddy Current Technology, Inc, de Richmond, Virginia, con una bobina tipo palpador de Zetec, posicionada manualmente sobre las zonas anteriormente citadas. En este trabajo se presenta el desarrollo de sensores y dispositivos de posicionamiento especiales para los ensayos, y las señales obtenidas

con algunos de ellos en el ensayo del cuadro 3, con el equipo MAD8D. Un avance de este trabajo se presentó en un congreso de ensayos no destructivos.¹⁸

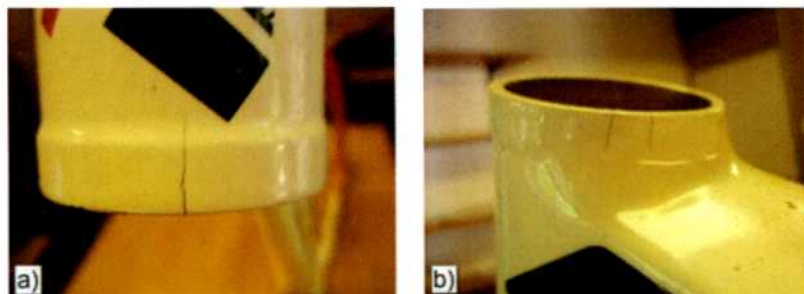


Figura 1.4. Fisuras en el tubo frontal del cuadro 2. a) parte inferior, b) parte superior.

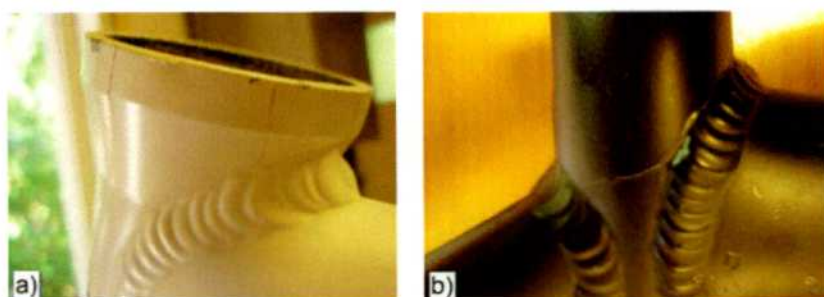


Figura 1.5. Cuadro 3. a) Zona del tubo frontal donde calza el stem. b) Zona del tubo soporte del sillín

2. Fabricación de cuadros de bicicleta

Los cuadros de aluminio para bicicleta utilizan tubos de perfiles no uniformes, como se puede ver en la Figura 2.1., que es un corte de uno de esos cuadros. Este diseño particular permite obtener propiedades mecánicas adecuadas minimizando la cantidad de material (y por lo tanto el peso del cuadro) y asegurando el confort del ciclista.

Para lograr estas características geométricas y mecánicas especiales, se somete a los tubos extrudidos al proceso de hidroformado, y luego se los corta y se procede a soldarlos, para construir el cuadro. Lo que permite esta técnica es lograr distintos espesores en la pared del tubo. El proceso conocido como conificado, con el cual es posible obtener desde uno hasta cuatro espesores de pared distintos, permite lograr una aleación más liviana y con la resistencia necesaria en los puntos críticos. Estos son las zonas cercanas a la soldadura, los extremos de los tubos, las zonas cercanas al tubo de dirección, la caja pedalera y donde se inserta el asiento. Lo que permite esta técnica, en resumen, es poner el material donde realmente tiene que estar.



Figura 2.1. Corte de un cuadro de bicicleta. Se aprecia la diferencia de sección y de espesor de pared en los diversos tubos que conforman el cuadro.

2.1 Extrusión de tubos de aluminio

La extrusión de aluminio es un proceso de deformación plástica de un lingote de aluminio precalentado que fluye por compresión a través de una matriz. Este proceso se puede realizar para producir perfiles (tubulares, rectangulares, etc), barras y varillas macizas a partir de tochos macizos que fluyen a través de matrices planas. Vamos a desarrollar el caso de perfiles tubulares. En la Figura 2.2, tenemos lingotes de aluminio para extrudir.



Figura 2.2. Lingotes de aluminio para extrudir.¹⁹

Los tubos de partida se obtienen mediante extrusión, derivando en un tubo de aluminio sin costura, "seamless". Para esto se deben producir lingotes huecos o lingotes macizos utilizando un sistema de mandril y prensa perforadora.

Para este proceso se emplea una matriz tubular del tipo puente u ojo de buey, "porthole", como la que se muestra en la Figura 2.3.

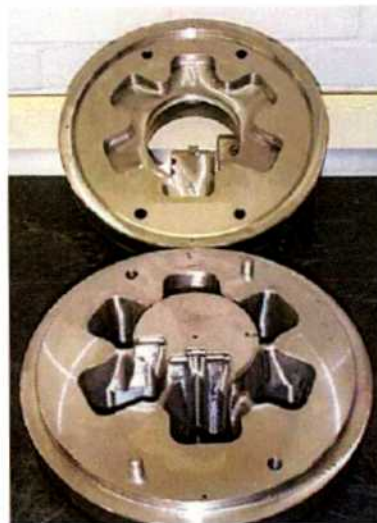


Figura 2.3. Matriz tubular de tipo puente²⁰

Al comenzar el proceso el material se separa en la dirección axial, para luego soldarse por acción de la presión y la temperatura justo cuando ingresa al agujero de la matriz que le da forma definitiva al perfil. Hay una gran cantidad de variables que van a definir la calidad del perfil extrudido. La misma va a estar delimitada por el conformado de cada parte y el posterior ensamblado, tales como el macho, matriz, backer (respaldo), etc, elementos que se muestran en la Figura 2.4.

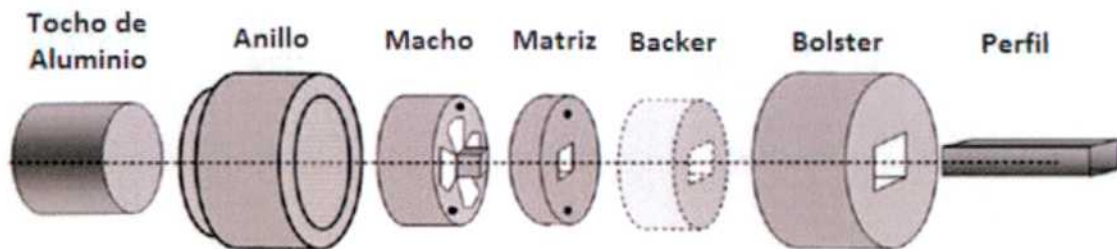


Figura 2.4. Elementos de un tren de extrusión²⁰

Las partes del tren de extrusión son:

- i) El macho, que es el encargado de generar las condiciones internas del perfil. Tiene dos o más puertos. El tocho de aluminio se separa en cada puerto y se unifica en la cámara de soldadura, "welding chamber". Los puertos están separados por los brazos, que apoyan la base o sección del macho, como se muestra en la Figura 2.5.
- ii) La matriz, que es la que define las características externas del perfil y se encuentra ensamblada con el macho.
- iii) El respaldo, "backer", que cumple la función de apoyo del herramental y está adyacente con el lado de salida de la matriz.

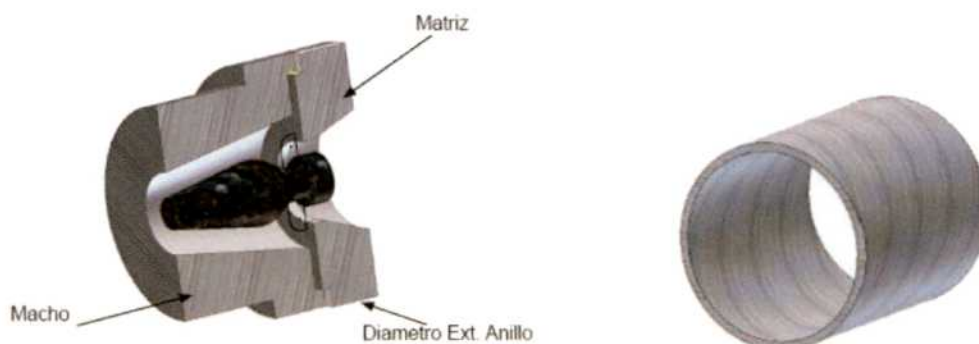


Figura 2.5. Matriz tubular y perfil tubular²⁰

Periódicamente deben realizarse controles para prevenir el mal funcionamiento de la extrusora, lo cual ocasiona defectos en el perfil. En general se recomienda inspeccionar la presencia de fisuras en los brazos a cámaras de soldadura del macho de la matriz y verificar la alineación de todo el sistema.

2.1.1 Defectos en extrudidos²¹

Algunos defectos comunes suelen ser los siguientes:

- Rayas por calidad de matriz

Causas de estas pueden ser: rayas; desgaste del plano de trabajo; acumulación de óxido de descarga; cambio abrupto de longitud del plano y alimentación de borde de liner.

En la Figura 2.6. se muestran rayas de matriz y en la Figura 2.7, líneas de óxido.

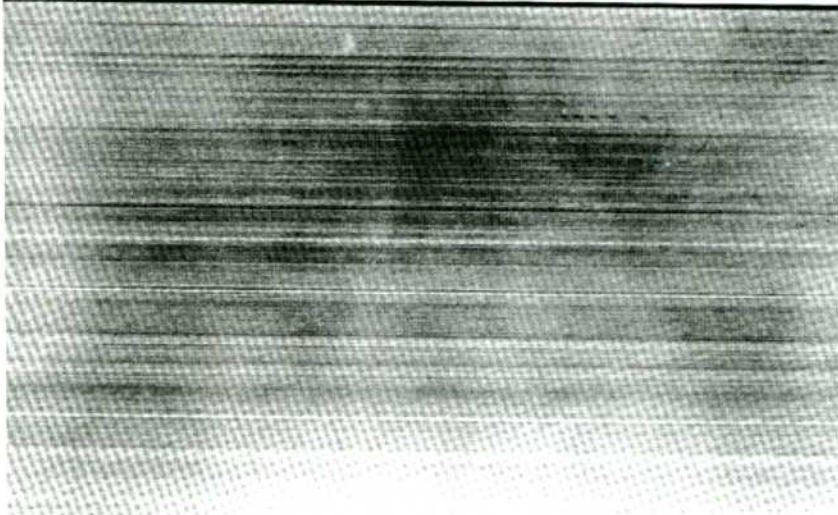


Figura 2.6. Defecto: Rayas por calidad de matriz.

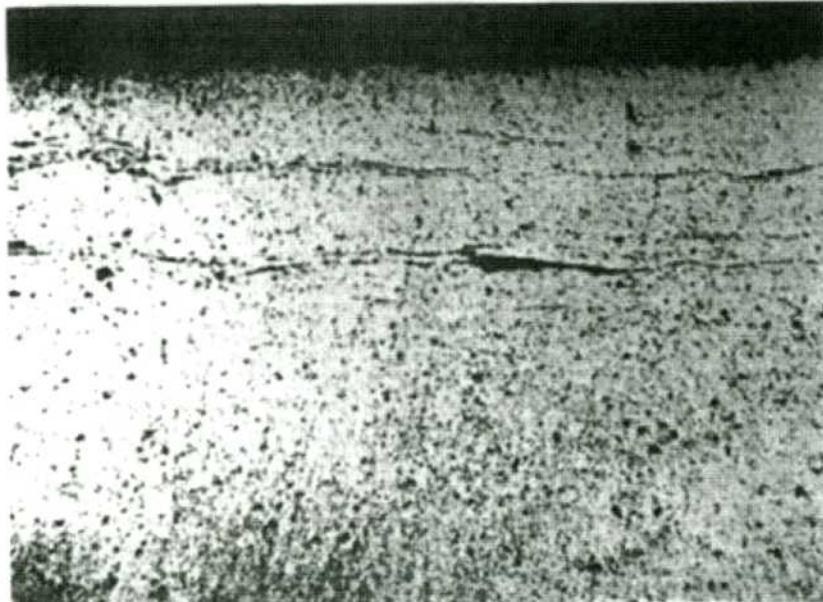


Figura 2.7. Defecto: Líneas de óxido.

- Rayas por calidad de tocho

Causas de estas pueden ser: barrote sin homogeneizar; inclusiones en el barrote (Figura 2.8); mala calidad superficial; serie 6xxx con alto Fe y suciedad superficial de tochos.

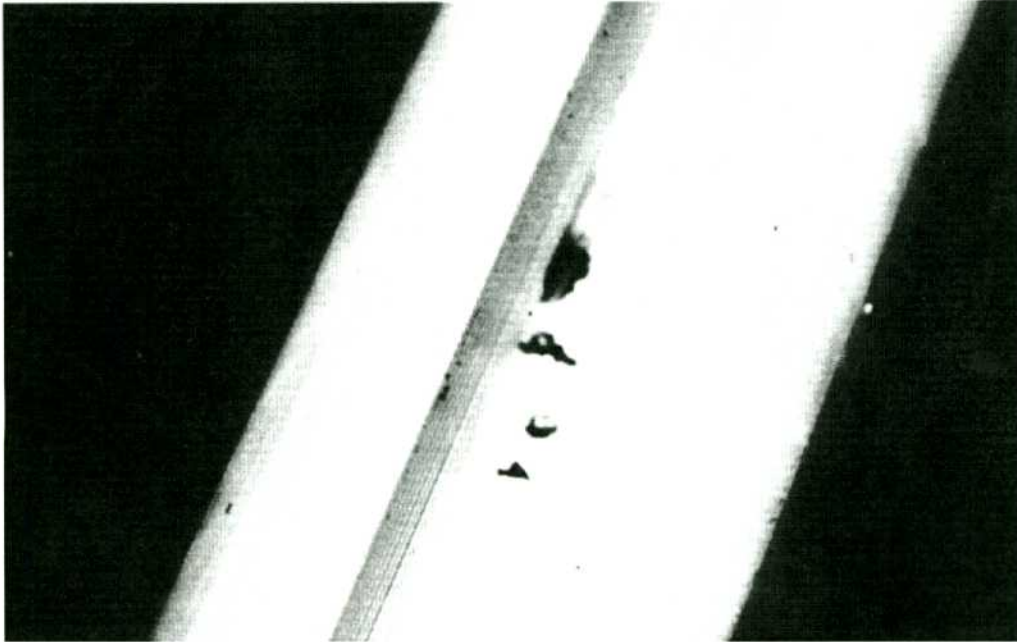


Figura 2.8. Defecto: una inclusión en un barrote.

- Rayas por práctica de extrusión

Causas de estas pueden ser: contenedor muy caliente; desalineación de prensa; desgaste del dummy block; desgaste del liner; exceso de lubricación y alta velocidad y/o alta temperatura.

2.1.2 Condiciones generales²¹

Las aleaciones de aluminio se pueden clasificar desde el punto de vista de extrusión en las tres siguientes categorías:

1) Aleaciones blandas

No tratables térmicamente:

Al Puro: 1050, 1060, 1080, 1100, 1200, 1260, 1350.

Al-Mn: 3003, 3004, 3005, 3103, 3105.

Tratables térmicamente:

Al-Mg-Si: 6005, 6060, 6061, 6063, 6101, 6106, 6082.

2) Aleaciones semiduras
 No tratables térmicamente:
 Al-Mg: 5005, 5050, 5251, 5052, 5754..
 Tratables térmicamente:
 Al-Zn: 7003, 7005, 7020.

3) Aleaciones duras
 No tratables térmicamente:
 Al-Mg: 5086, 5083, 5056.
 Tratables térmicamente:
 Al-Cu: 2014, 2017, 2024.
 Al-Zn: 7049, 7075.

La Tabla 2.1 presenta el índice de extrudabilidad de diversas aleaciones de aluminio. Este índice da una idea de la facilidad de extrudir una aleación a la mayor velocidad compatible con la forma del perfil, su calidad superficial y las propiedades mecánicas de la misma. Este índice depende de la temperatura de extrusión, de la presión y de la forma particular a obtener, así como también de la calidad del lingote.

Aleación	Indice de Extrudabilidad
1350	160
1030	135
1100	135
3003	120
6060	110
6063	100
6061	60
2011	35
5086	25
2014	20
5083	20
2024	15
7075	9
7178	8

Tabla 2.1. Índice de Extrudabilidad de diversas aleaciones.²²

La Figura 2.9 muestra un diagrama de las temperaturas de extrusión para distintos materiales y la Figura 2.10, un diagrama de temperatura vs tiempo para la extrusión de un aluminio 6063.

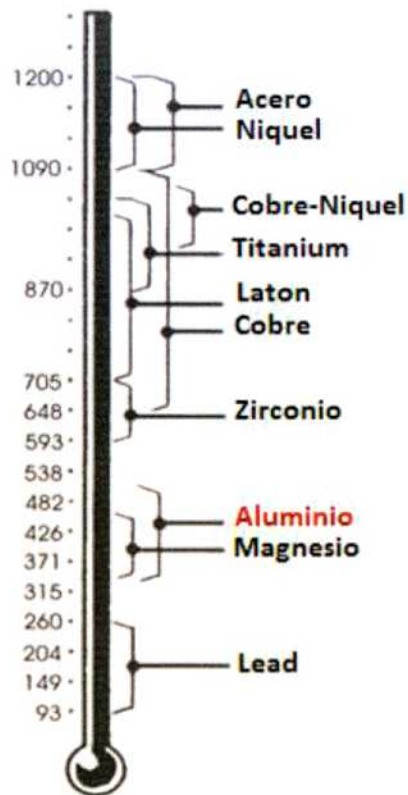


Figura 2.9. Temperatura de extrusión para distintos materiales.

PRODUCCIÓN DE EXTRUIDOS - DIAGRAMA TEMPERATURA - TIEMPO

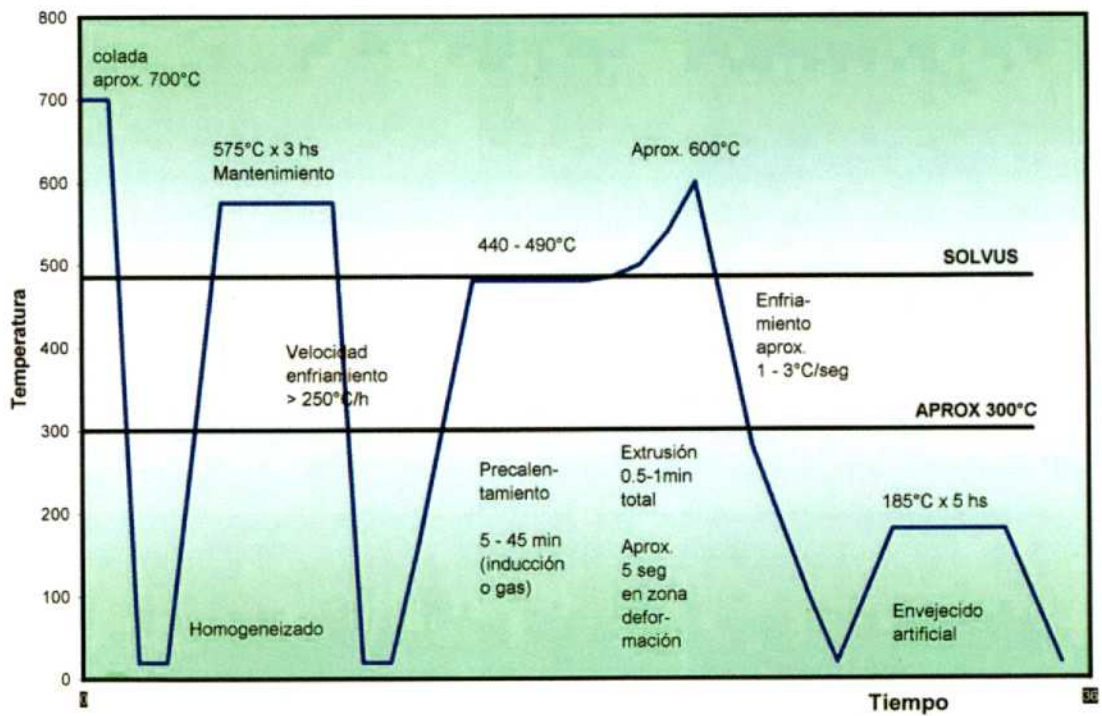


Figura 2.10. Extrusión del Al 6063.

2.2. Hidroformado: Aplicación para cuadros de bicicletas

La técnica de hidroformado permite conformar una pieza mediante la utilización de un fluido a presión. La función del fluido es darle la forma deseada, que se va a obtener de la matriz correspondiente. Se utiliza además una compresión axial simultánea para evitar un excesivo adelgazamiento del espesor del tubo en las zonas sometidas a una fuerte expansión.

Este proceso es una alternativa a los métodos convencionales mecánicos por razones de flexibilidad (simplificación de utillajes o equipos) y mejora de condiciones de proceso (fundamentalmente reducción de fuerzas de fricción), que van a permitir mayores deformaciones, mejor precisión, mejoras en las tensiones residuales posibilitando la obtención por deformación de piezas imposibles de producir por métodos convencionales (especialmente en piezas a partir de elementos tubulares y componentes donde es crítica la relación peso-resistencia). Es muy utilizado para obtener formas complejas en componentes tubulares.

El proceso consiste de los siguientes pasos:

- 1) Se cargan tubos rectos o preformados en la matriz.
- 2) La matriz se cierra por un proceso hidráulico que puede conformar de manera mecánica el tubo durante el cierre.
- 3) Los punzones de sellado cierran las extremidades del tubo y se inicia el llenado.
- 4) El material se expande por el incremento de presión del líquido que se realiza conjuntamente con el avance simultáneo de los punzones de sellado, fluye hacia el interior de las zonas de conformado y la configuración final de la pieza.

El proceso se ilustra en la Figura 2.11:

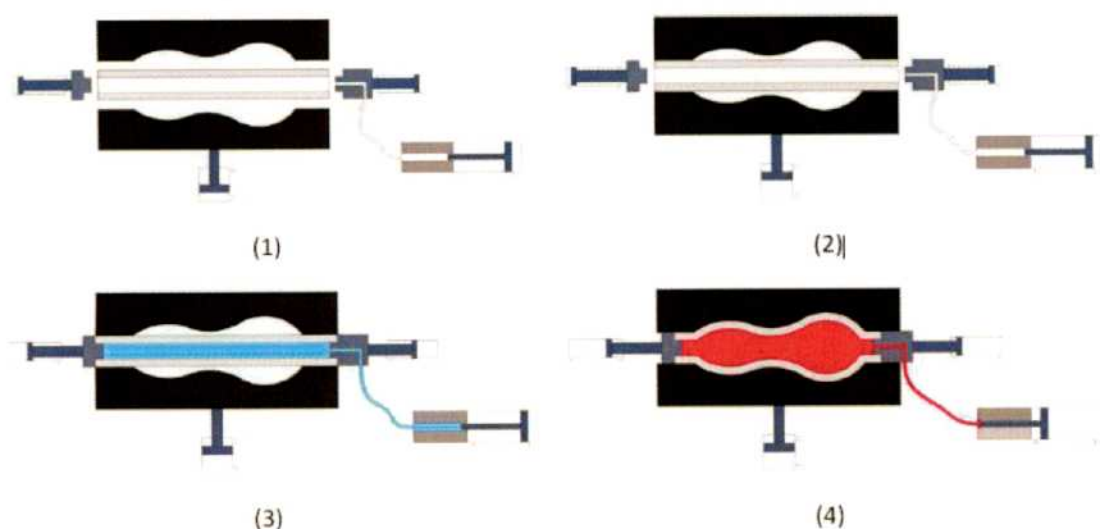


Figura 2.11. Proceso de hidroformado²³

El tubo altera su forma durante el proceso permitiendo diferentes cambios de sección a lo largo de su longitud, obteniéndose unas formas suaves, lo que proporciona mayor rigidez que una pieza estampada. Esto puede apreciarse en la figura 2.12.



Figura 2.12. Perfil tubular hidroformado.²⁴

Al construir bicicletas con cuadros de aluminio, se busca que sean más livianos que los de acero y con propiedades mecánicas similares. Estas prestaciones no se pueden lograr usando tubos de sección uniforme resistente. Para lograr secciones elípticas o triangulares y espesores de pared variable mediante estampado o prensado del material, se crean puntos críticos, que suelen no ser detectados a primera vista. Por ejemplo, en los bordes o en las caras redondeadas, se presentan puntos de concentración de tensiones, debido a que en el inicio del proceso, la distribución de presión no es uniforme. El proceso de hidroformado, durante el cual el fluido es introducido de manera uniforme a alta presión dentro de la matriz, permite la obtención de tubos con formas complejas y de espesor variable, logrando así las mejores prestaciones para el aluminio, cumpliendo con el objetivo buscado de aumentar la relación resistencia-peso.

Luego estos procesos pueden ser combinados con tratamientos térmicos para aumentar las propiedades mecánicas, tales como resistencia y rigidez. Presentan un excelente acabado superficial, que facilita la pintura o la adhesión de recubrimientos sobre las piezas. El resultado es un cuadro liviano y resistente.^{25 26 27}

Para el armado del cuadro, los fabricantes de tubos hidroformados dan instrucciones muy precisas en cuanto a manipulación, limpieza, sujeción y proceso de soldadura, de manera de que no se deterioren las propiedades de los tubos. El proceso más importante es la alineación del cuadro, el cual es pos soldadura.

2.3. Las zonas a estudiar

La zona a estudiar se denomina tubo de dirección, en inglés “head tube”. En los cuadros de bicicleta estudiados, se vio fisuración en el tubo de dirección y en la inserción del sillín. Ambos están contruidos con trozos de tubo de sección cilíndrica y están soldados a la armadura del cuadro. El tubo de dirección, ver Figura 2.13, presenta emboquillados en ambos extremos.

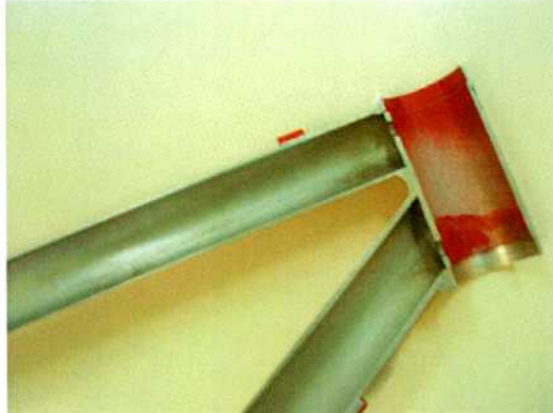


Figura 2.13. Ejemplo de tubo de dirección

Allí se insertan el stem y la horquilla, que deben estar bien centrados y recibir la tensión adecuada para una buena sujeción “sin juego” y un óptimo funcionamiento.

3. Ensayos no destructivos

3.1 Corrientes Inducidas

El método de corrientes inducidas es un método de ensayos no destructivos aplicable a metales no ferromagnéticos, que consiste en utilizar bobinas para inducir una distribución de corriente eléctrica alterna en las piezas a ensayar y monitorear la variación de esta corriente al recorrer la pieza. Las variaciones se deben a discontinuidades en la pieza y producen señales (también llamadas “indicaciones”) que el operador debe interpretar, y que contienen información sobre naturaleza, forma y tamaño de las discontinuidades. Éstas pueden ser inclusiones, fisuras por fatiga, poros, interfases, etc. Si su presencia vuelve a la pieza “no apta para el servicio”, estas discontinuidades se denominan “defectos”.

El fundamento eléctrico del método de corrientes inducidas radica en un circuito básico inductivo-resistivo, como el indicado en la figura 3.1.

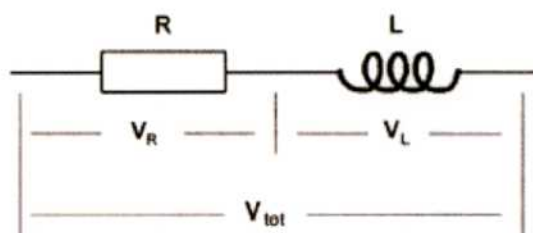


Figura 3.1 Circuito inductivo-resistivo.²⁸

Este circuito está caracterizado por las siguientes ecuaciones:

$$V_{tot} = RI + \frac{dI}{dt}$$
$$V_{tot} = (R + j\omega L)I$$

La figura 3.2 presenta el circuito completo empleado en corrientes inducidas.

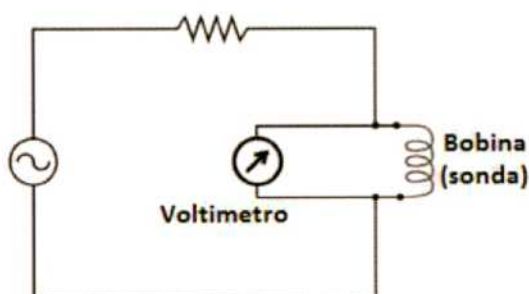


Figura 3.2 Circuito de corrientes inducidas.²⁸

Las ecuaciones básicas empleadas en corrientes inducidas son la ley de Faraday y la ley de Ohm:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\Delta V = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\sigma E = J$$

Las ecuaciones anteriores se deducen del principio de inducción electromagnética. Cuando una espira conductora se sitúa bajo la acción de un campo magnético variable, se genera en ella una fuerza electromotriz (fem) inducida, la cual da lugar a la aparición de un flujo de corriente eléctrica en la espira, cuya intensidad será proporcional a la fem inducida e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del conductor.

Análogamente, en una muestra conductora situada bajo la acción de un campo magnético variable, se generará una fem inducida que dará lugar a la aparición de líneas de corriente eléctrica cerradas, que se extenderán en capas concéntricas por el volumen de la muestra ya que ésta puede considerarse formada por infinitas espiras de sección infinitesimal. Este fenómeno puede apreciarse en la figura 3.3, donde se presenta un diagrama con el circuito correspondiente y se señalan las corrientes inducidas en el material. En la figura 3.4, se presenta el mismo diagrama, pero esta vez las corrientes inducidas son afectadas por una fisura en el material.

Es importante destacar que las líneas de corriente, deben ser perpendiculares a la fisura, de lo contrario, la fisura puede no ser detectada, Figura 3.5.

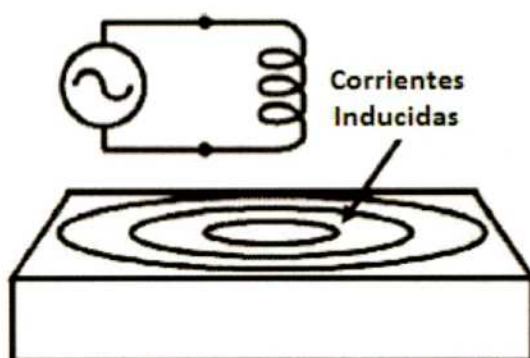


Figura 3.3 Corrientes inducidas en un material. ²⁸

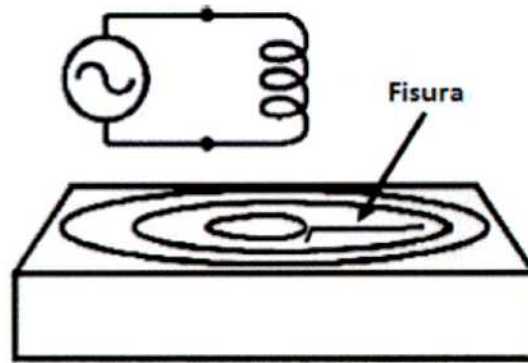


Figura 3.4 Corrientes inducidas afectadas por una fisura.²⁸

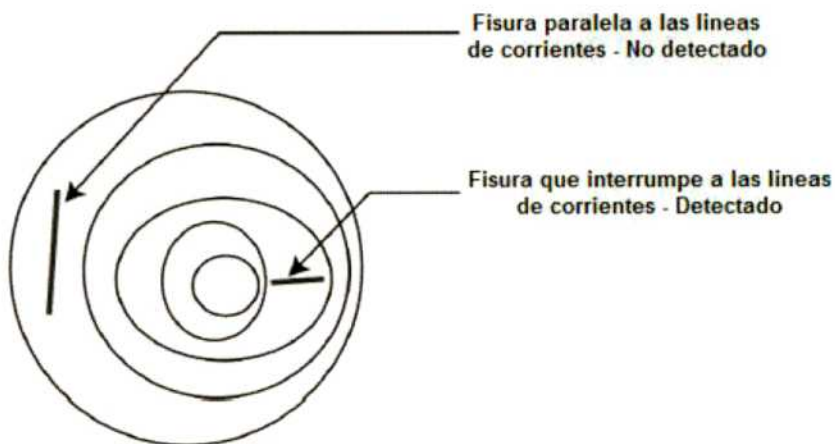


Figura 3.5 Detección de fisura por corrientes inducidas.²⁸

La excitación y detección del campo electromagnético se realiza a través de bobinas electromagnéticas en las cuales fluye corriente de alta frecuencia (100Hz a 10MHz).

El procesamiento de la información obtenida de la interacción entre el campo electromagnético y el material se hace en forma electrónica. Este procesamiento puede conducir a una simple presentación en un instrumento analógico o bien proveer un análisis detallado de las señales a través de una instrumentación más compleja que puede incluir etapas de computación.

La corriente alterna que circula por el inductor se acerca a la superficie de la pieza o se coloca dentro de ella o rodeándola, según convenga por la geometría y la accesibilidad. Esta corriente alterna induce corrientes en el material, en zonas cercanas a la superficie. A su vez, por inducción mutua, la corriente que circula por la bobina resulta alterada por la que circula en el material. Como las corrientes inducidas se ven afectadas por fallas y variaciones en la pieza, es posible detectar la presencia de discontinuidades a partir de variaciones en la tensión y la fase eléctricas en la bobina de detección.

Este tipo de corriente eléctrica se conoce generalmente como corrientes inducidas. También puede tomar diversos nombres como corrientes parásitas o

corrientes de Foucault. En inglés se conocen como “eddy currents”, por la corriente en forma de torbellino.

Como en todos los métodos de END, la evaluación de las indicaciones se hace en base a la comparación con las que se obtienen de probetas de calibración (pieza patrón) especialmente preparadas para cada caso particular de ensayo.

La amplitud y la fase de las corrientes inducidas dependen de:

- La conductividad eléctrica de la pieza.
- La permeabilidad magnética de la pieza.
- La distancia de separación entre la pieza y la bobina, conocida como lift-off.
- La frecuencia de la corriente alterna que circula por la bobina.
- Las dimensiones de la bobina y la pieza.
- La presencia de discontinuidades.

Hay que poder discriminar estas variables para interpretar los resultados.

Con este método es posible resolver los siguientes problemas de defectología:

- Discontinuidades (fisuras, poros, pliegues, inclusiones)
- Inclusiones, segregaciones.
- Modificaciones de estructura y cambio de fases.
- Erosión, corrosión, fisuras de fatiga.

También se puede evaluar lo siguiente:

- Medición de propiedades físicas (permeabilidad y conductividad eléctrica)
- Composición química
- Medición de espesores (tubos delgados, laminas)
- Medición de recubrimientos.

Existen dos métodos básicos de detección por corrientes inducidas:

- Método de impedancia: en el cual la detección se hace directamente sobre la bobina de excitación.
- Método emisor-receptor: en el cual la detección se hace con una segunda bobina que se encuentra dentro del flujo magnético que atraviesa al material y a la bobina de excitación.

En ambos casos, el ensayo puede hacerse en:

- modo “diferencial” o “auto-referencia”, en el cual se compara un tramo de la pieza con otro adyacente, las bobinas conectadas en ramas opuestas del puente
- modo “absoluto” o de “referencia externa”, en el cual se recorre la muestra con una bobina y se compara la tensión en ésta con la de una bobina en

contacto con una pieza de referencia y conectada en la otra rama del puente de alterna

3.1.1 Plano de Impedancia

La impedancia de la sonda en presencia de materiales conductores se puede representar por una curva en el plano de impedancia. Cada punto de esta curva corresponde a un parámetro que es función de la inductancia de la sonda, la resistencia de la pieza y la frecuencia de trabajo. El estudio de esta curva permite correlacionar los cambios de impedancia con las características de la muestra. Ver figura 3.6.

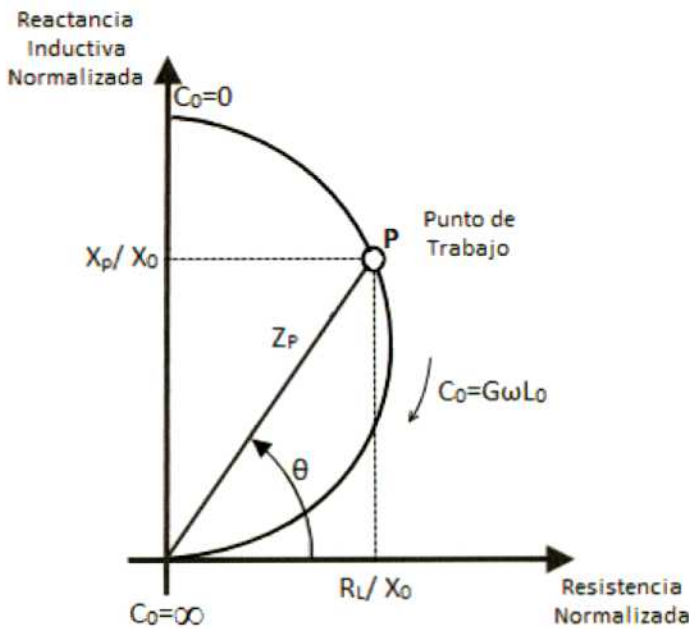


Figura 3.6 Curva de impedancia normalizada.²⁹

El punto P, conocido como punto de trabajo o punto operativo, es aquel punto en el cual la sonda se encuentra en un lugar libre de discontinuidades (una zona “sana” de la pieza a inspeccionar). Corresponde al equilibrio del sistema y tiene una impedancia Z_p . Si se trata de discontinuidades localizadas, la sonda presenta esa impedancia Z_p antes y después de haber pasado por ella.

Al recorrer la muestra con la sonda durante un ensayo, la presencia de discontinuidades se manifiesta como “trazas” sobre el plano de impedancia. En la figura 3.7 se ve el “desplazamiento del vector impedancia” debido a una fisura en la muestra. El extremo del vector se mueve desde (1) hasta (2) al pasar la sonda sobre la fisura, y vuelve a (1) al encontrar la sonda nuevamente material sano.

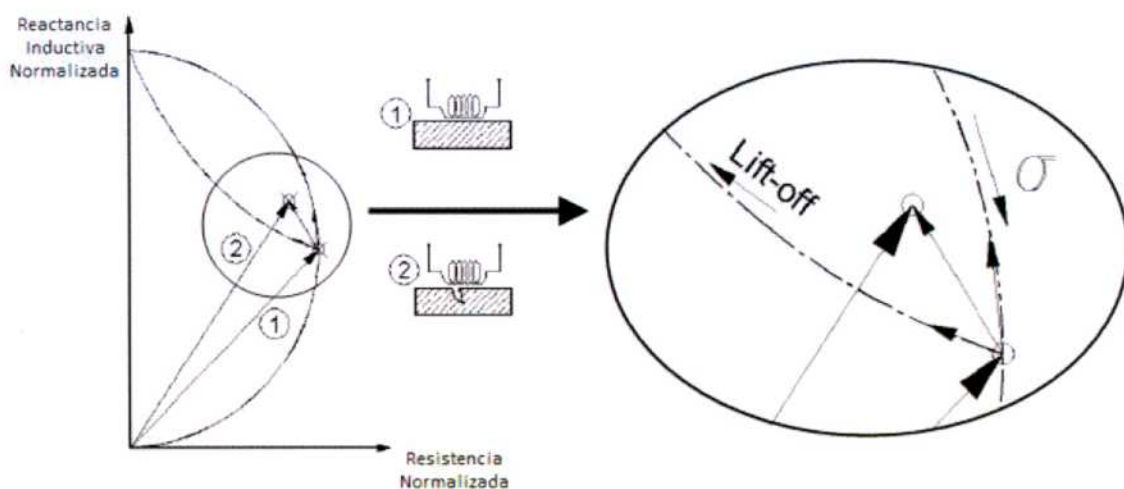


Figura 3.7 Efecto debido a una fisura.³⁰

3.1.2 Sondas

La sonda es el sensor, generador y receptor de energía electromagnética involucrado en el ensayo. Esta consiste de una bobina o una combinación de bobinas dispuestas en un soporte, que permite inspeccionar la pieza. Tiene dos funciones, generar el campo magnético que induce la corriente en la pieza inspeccionada y detectar el flujo de corrientes en la pieza.

Las sondas se pueden clasificar en tres tipos:

- Palpadores

Este tipo de bobinas también son conocidas como bobinas de superficie, bobina plana o bobina panqueque. Están constituidos por una bobina principal o por una bobina principal y otra secundaria, cuyo eje es perpendicular a la superficie de la muestra y la corriente que pasa por las espiras de la bobina es paralela a la superficie de la muestra. El núcleo de estas bobinas puede ser de aire, un material no conductor o material ferromagnético (núcleo de ferrita). Normalmente la bobina se incluye en una carcasa y se protege por un material no conductor para impedir el rozamiento de las espiras con la superficie de la muestra. Dependiendo de la aplicación, el diámetro de la bobina varía entre 2,5 mm y 300 mm. Estos tipos de sondas fueron los empleados en este trabajo.

- Circunferencial externa

Este tipo de sensores se emplean fundamentalmente en barras cilíndricas y tubos. La bobina rodea a la pieza, que se va a desplazar a través de su interior. Idealmente, el eje de la pieza coincide con el de la bobina. Este método suele emplearse para inspecciones en líneas de producción.

- Circunferencial interna

Como lo indica su nombre, estas son empleadas en la inspección interior de tubos. Es útil para inspeccionar instalaciones en servicio, tales como intercambiadores de calor. La sonda es conducida por el interior del tubo. Idealmente, el eje de la pieza coincide con el de la bobina

3.1.2.1 Sondas utilizadas

Las sondas empleadas en este trabajo son del tipo palpadores. Se probaron diferentes sensores: una bobina comercial marca Zetec® para uso manual para 50 a 500 kHz (Figura 3.9), bobinas planas desarrolladas en nuestro laboratorio (Figura 3.10) y bobinas tipo panqueque (Figura 3.11), similares a la comercial, pero construidas en el laboratorio.

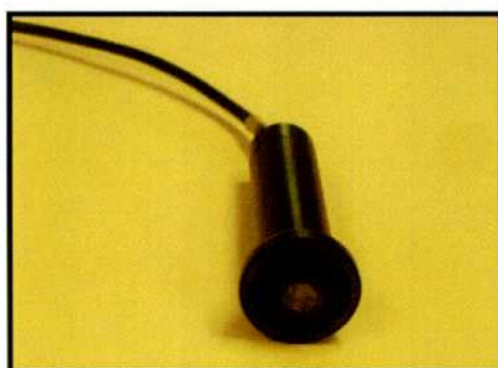


Figura 3.9 Bobina Zetec.

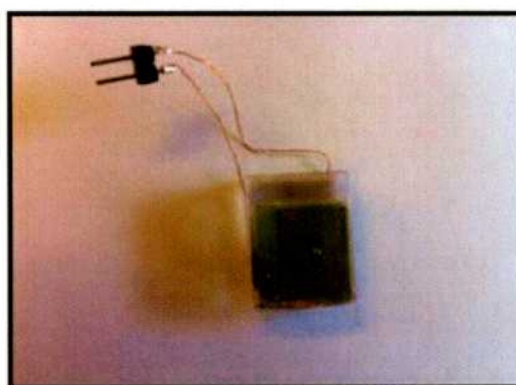


Figura 3.10 Bobina plana.

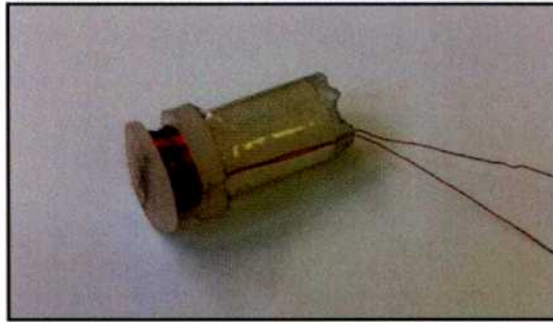


Figura 3.11 Bobina tipo panqueque construida en el laboratorio.

3.1.2.1.1 Bobina Zetec®

Con esta bobina se tomaron las primeras mediciones en los cuadros en el trabajo realizado previamente en el laboratorio.¹ A continuación mostramos los resultados más relevantes con esta bobina.

Para la calibración se utilizó un bloque patrón de fisuras superficiales, modelo Zetec 950-9100, de aluminio 7075-T6, con tres ranuras de una apertura de 0,006" (0,154 mm) y profundidades 0,008" (0,203 mm), 0,020" (0,508 mm), 0,040" (1,016 mm) respectivamente (Figura 3.12) y para medir, la bobina Zetec para uso manual para 50 a 500 kHz de la Figura 3.8. Las señales se tomaron en cuatro frecuencias (30, 50, 70 y 90 kHz). En este trabajo se muestran solamente las correspondientes a 90 kHz. Lo que se realizó se encuentra esquematizado en la Figura 3.13. La Figura 3.14 muestra las señales de calibración, la traza más corta y de menor ángulo correspondiendo a la ranura más pequeña.

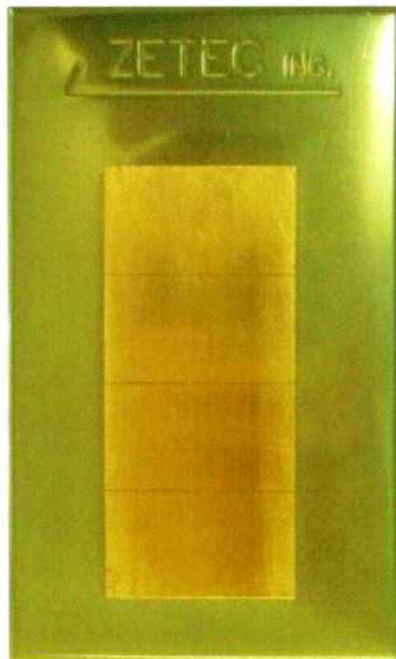


Figura 3.12 Bloque patrón de fisuras superficiales de Al 7075.

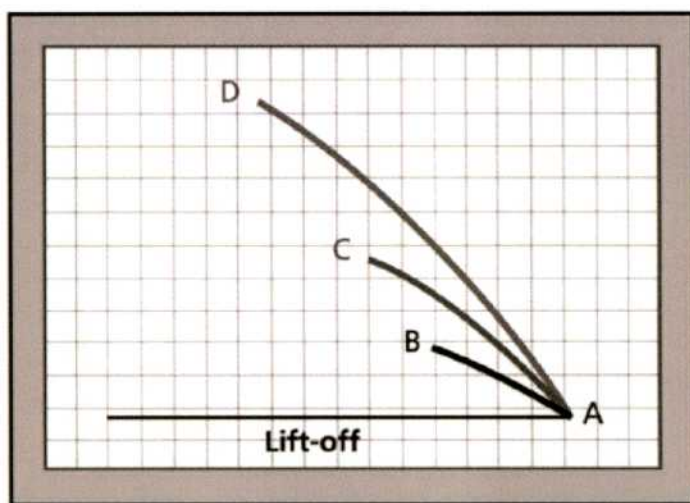
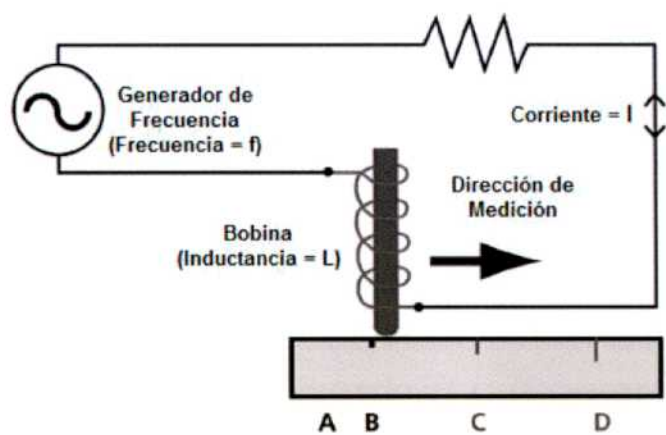


Figura 3.13 Pieza analizada y señal obtenida.³¹

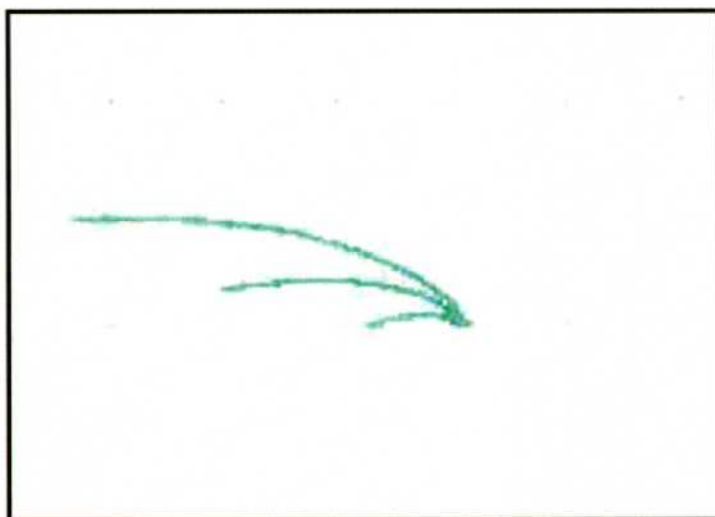


Figura 3.14 Señal de calibración.¹⁷

En las Figuras 3.15 a 3.17 se observan las indicaciones de CI producidas por las regiones de los cuadros descritas en la sección 1.3, registradas en iguales condiciones experimentales que la calibración. La Figura 3.15 muestra la señal de la fisura en la parte inferior del stem del “cuadro 2”, zona que se muestra en la Figura 1.3a.

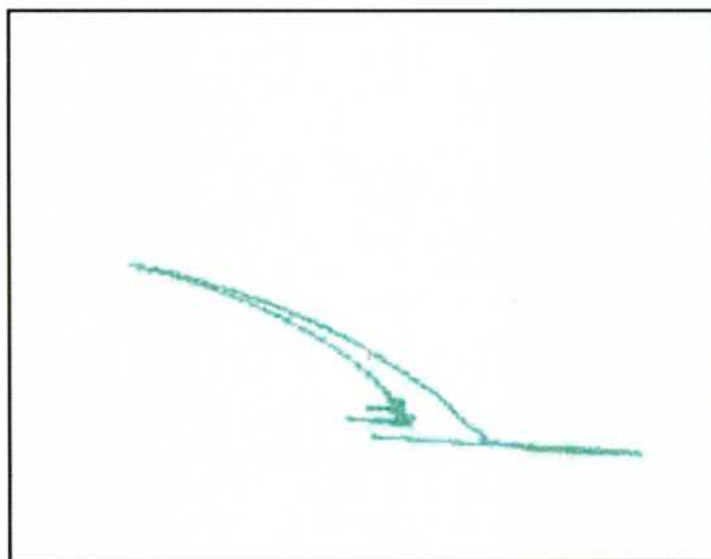


Figura 3.14 Señal de CI de la fisura en el cuadro 2, donde calza la horquilla.¹⁷

Las Figuras 3.16a y 3.16b presentan las indicaciones de dos fisuras en el cuadro 3, en la región de soporte para el manillar, que se muestra en la Figura 1.4a. La Figura 3.17 muestra la indicación de una fisura en el cuadro 3, en una zona entre dos cordones de soldadura, donde calza el sillín. El aspecto de la pintura (Figura 1.4b) permitiría sospechar que la fisura estaba presente al momento de pintar el cuadro.

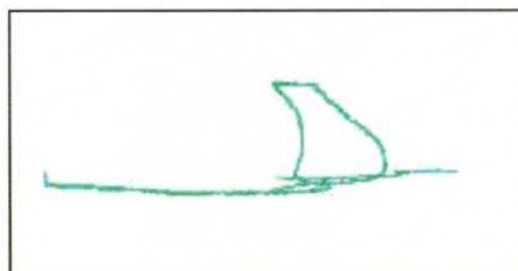
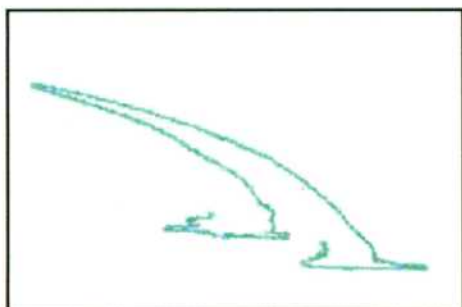


Figura 3.16. Señales de fisuras en el cuadro 3, zona donde calza el manillar. a) Fisura grande, b) una de las fisuras menores, cercana al cordón de soldadura, posiblemente en la zona afectada por el calor (ver Figura 1.4a).¹⁷

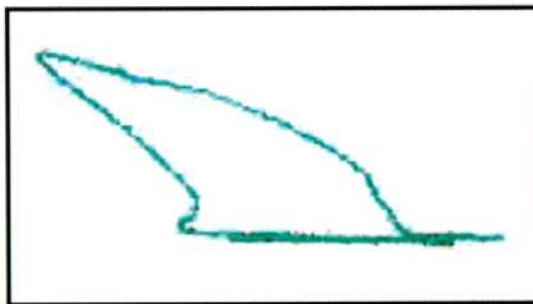


Figura 3.17. Señal de una fisura en el cuadro 3, en una sección de tubo entre soldaduras, donde calza el caño del sillín (ver Figura 1.5b).¹⁷

3.1.2.1.2 Bobina Plana

Esta sonda se fabricó a partir de una bobina plana rectangular desarrollada en nuestro laboratorio. El desempeño de las mismas ya fue comprobado en trabajos anteriores y se obtuvieron resultados aceptables. Estas bobinas tienen alta sensibilidad y la gran ventaja de ser flexibles.^{32 33}

De las ocho bobinas que aparecen en el circuito impreso de la Figura 3.18 (sus medidas son 100 x 50 mm), se utilizaron las señaladas con los números 1 a 3. Estas bobinas se recortaron y se pegaron sobre soportes especiales de acrílico (para poder utilizar las bobinas), a los que se dio la curvatura adecuada a la pared del tubo a inspeccionar, tanto interna como externa, Figura 3.19. Estos son los soportes especiales diseñados. La Figura 3.20, presenta tanto las sondas externa e interna con las bobinas planas, ahora curvadas. Las sondas fueron utilizadas en modo absoluto con una pieza de referencia, en un montaje como el que se va a describir en la Sección 3.1.3. y se muestra en la Figura 3.25. Se construyeron dos sondas iguales, una que recorre la pieza (sonda interna), y otra que se usa como referencia (sonda externa) y se mantiene en una posición fija durante la inspección, sobre un tramo de tubo que se considera sano. De las tres utilizadas, solo se obtuvieron indicaciones consistentes con la bobina 1. Las primeras mediciones se realizaron con las bobinas planas en un soporte plano, Figura 3.21, sobre la muestra patrón Zetec de Aluminio (Figura 3.12)

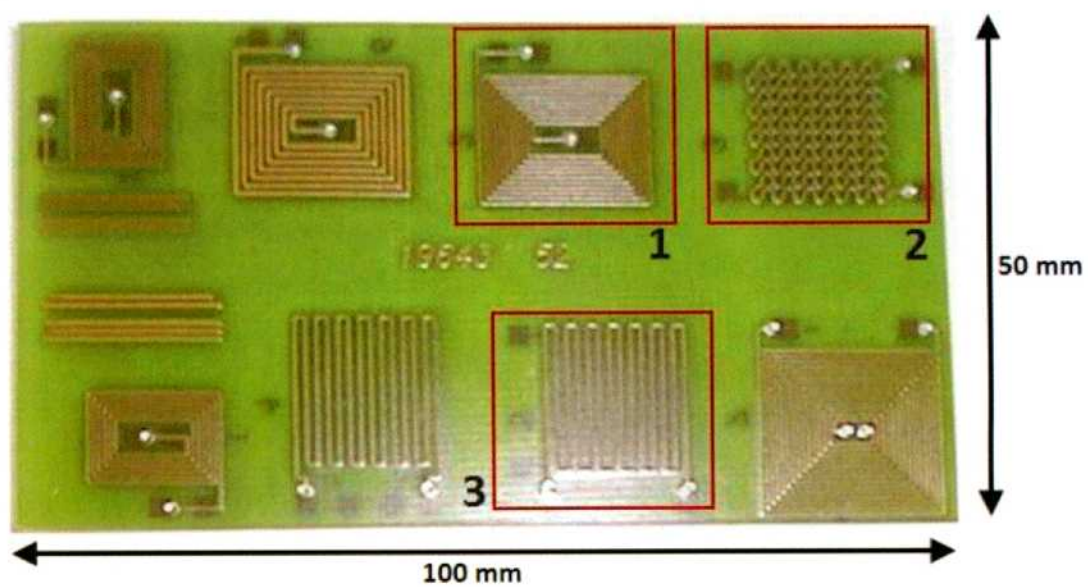


Figura 3.18. Plantilla de bobinas planas.

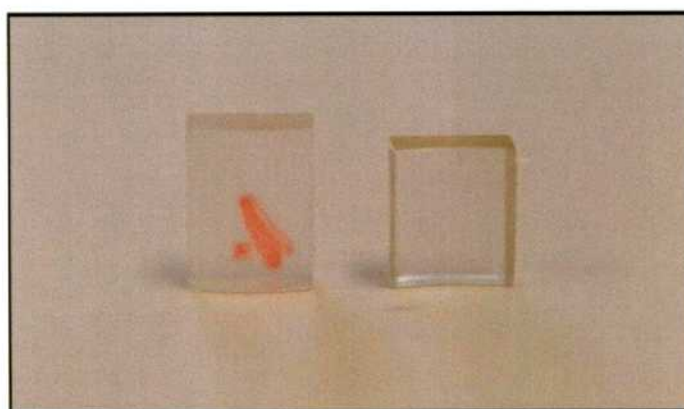


Figura 3.19. Soporte para bobinas planas.

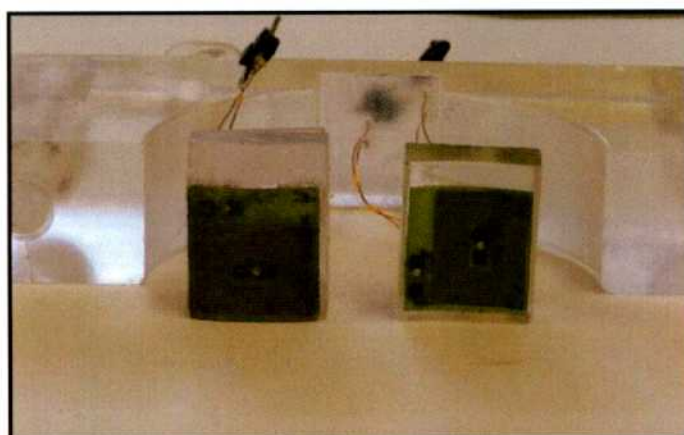


Figura 3.20. Porta sondas con bobinas planas.

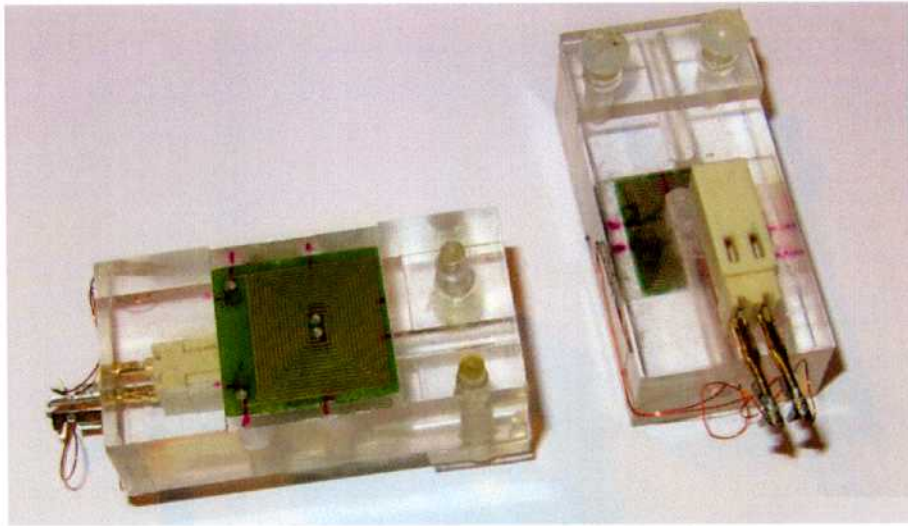


Figura 3.21. Soporte plano con bobinas planas.

La bobina 1 está esquematizada en la figura 3.22. La misma fue construida con la técnica de fabricación de circuitos impresos y está formada por caminos de cobre electrolítico de sección aproximadamente rectangular. Estos caminos están depositados sobre un sustrato de fibra de vidrio, pudiendo haber caminos superpuestos en ambas caras de diferentes sustratos, dando origen a las diferentes capas de una misma bobina. Aquí se trabajó con configuraciones de 2 capas sobre un único sustrato. En este trabajo se consideró una bobina formada por dos caminos de cobre de 10 vueltas cada uno depositados sobre las caras opuestas del mismo sustrato aislante (bobina de dos capas). Estas dos capas fueron conectadas en serie, de modo que la corriente circule en el mismo sentido en ambas, para que los campos magnéticos generados por cada una de ellas se sumen. Ambas capas están conectadas a los respectivos terminales naranja y verde indicados en la figura 3.22.³³

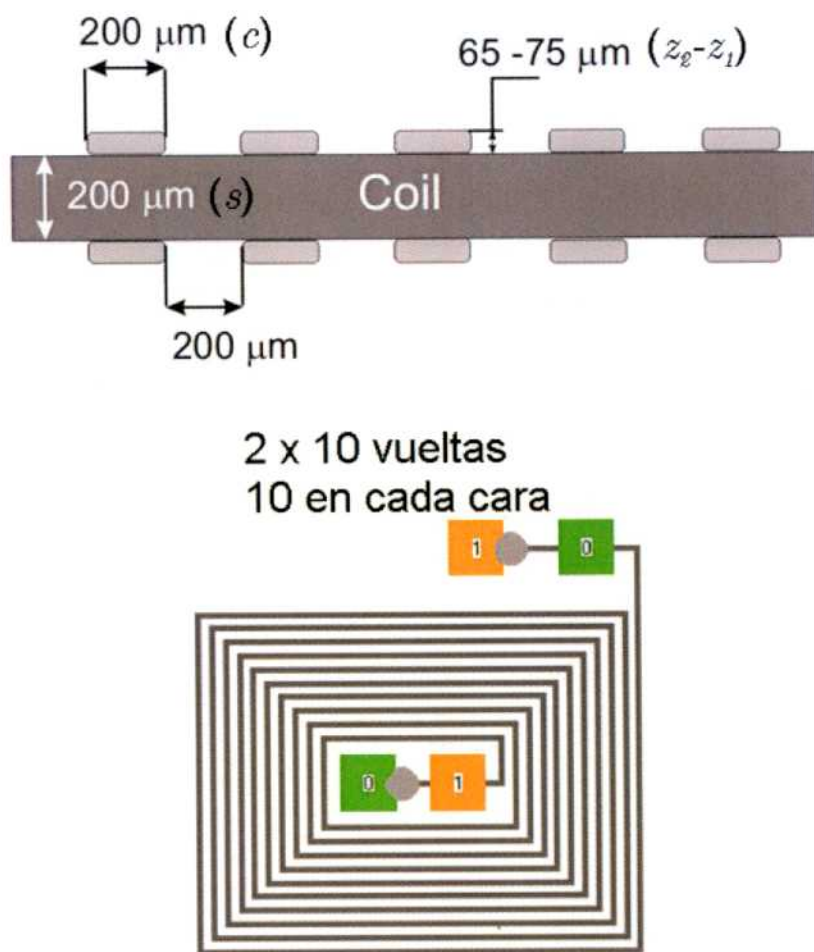


Figura 3.22. Características generales de las bobinas utilizadas. Arriba se muestra de perfil una bobina de dos capas. Abajo se muestra la bobina de frente, es de dos capas (una en cada cara de un sustrato de fibra de vidrio).^{32 33 34}

Según la información aportada por el fabricante de las bobinas, el ancho de los caminos de cobre (denotado con c) y la separación entre los mismos miden alrededor de 0,2 mm (200 μm en la figura 3.22), el espesor de estos caminos ($z_2 - z_1$), es aproximadamente de 0,065 mm (65-75 μm en la figura 3.22) y el espesor del sustrato de fibra de vidrio (identificado como s) es de 200 μm (ver también la figura 3.22). La bobina está recubierta por una película antisoldante protectora de aproximadamente 20 μm . El área de la bobina 1 es de 131 mm^2 (siendo un rectángulo de 12,8 mm por 10,2 mm, aproximadamente).³⁴

3.1.2.1.3 Bobina Tipo Panqueque (Pancake coils)

Estas bobinas fueron construidas en el laboratorio. Para el diseño de las mismas, se utilizó el software Bobimul, desarrollado en el Departamento. Este software calcula el número de espiras (**N**) que deberá tener una bobina, dadas la geometría y la inductancia (*L*). Para iniciar el cálculo, se estima la frecuencia de trabajo que asegure una buena distribución de las corrientes inducidas en el espesor de la pieza, y a partir de la impedancia de la bobina en aire, se computa la inductancia adecuada, que en este caso resultó ser $L = 168 \mu\text{Hy}$.

Para determinar *N* de la bobina que se está diseñando, se utiliza una fórmula aproximada, que relaciona la geometría, **N** y *L*. Para el caso de un palpador corto, longitud < diámetro externo, el programa se basa en la fórmula aproximada (3.1) ²⁹

$$L = \left(\frac{N}{100000} \right)^2 4\pi\mu_r R_m \left[\ln\left(\frac{8R_m}{k} \right) - 2 \right] \quad (3.1)$$

donde las longitudes están en *mm*, la inductancia en μHy y

$$k = 0,112 \cdot (2 \cdot l + d_e + d_i) \quad (3.2)$$

$$R_m = \frac{d_e + d_i}{4} \quad (3.3)$$

$$\text{Si llamamos } q = 4\pi\mu_r R_m \cdot \left[\ln\left(\frac{8 \cdot R_m}{k} \right) - 2 \right] \quad (3.4)$$

el programa calcula **N** a partir de la ecuación (3.5),

$$N = 10^5 \cdot \sqrt{\frac{L}{q}} \quad (3.5)$$

Se ingresan entonces las dimensiones del carretel: diámetro externo, interno y longitud.

$$d_e = 6 \text{ mm}$$

$$d_i = 2,5 \text{ mm}$$

$$l = 2,5 \text{ mm}$$

En este caso, **N** = 387 vueltas.

A partir de **N** y las dimensiones del carretel, el software sugiere un diámetro de alambre y calcula la longitud necesaria y la resistencia del mismo.

En este caso, el diámetro sugerido fue $d_{\text{alambre}} = 0,9 \text{ mm}$, resultando $R = 1,84 \Omega$ y el rango de impedancia de la bobina

$$Z_{\text{max}} = 187 \Omega \text{ (a la frecuencia de trabajo máxima seleccionada)}$$

$$Z_{\text{min}} = 75 \Omega \text{ (a la frecuencia de trabajo mínima seleccionada)}$$

Con la información detallada anteriormente, se procedió a la fabricación de las bobinas (figura 3.23 y figura 3.24).

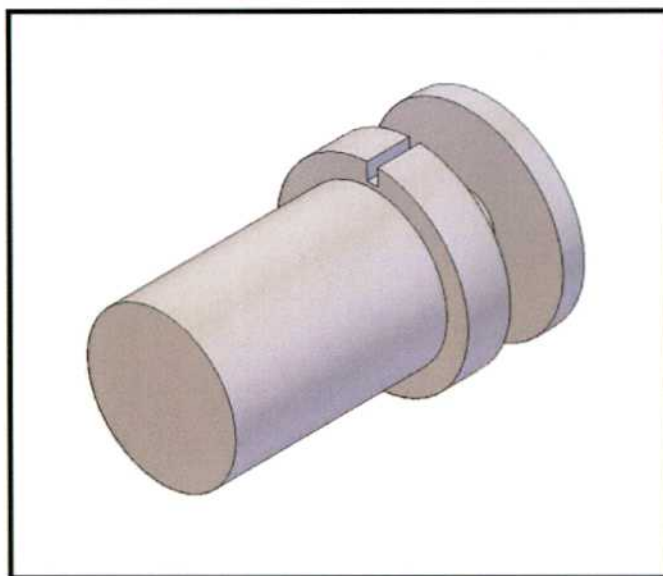


Figura 3.23. Diseño de bobina panqueque.

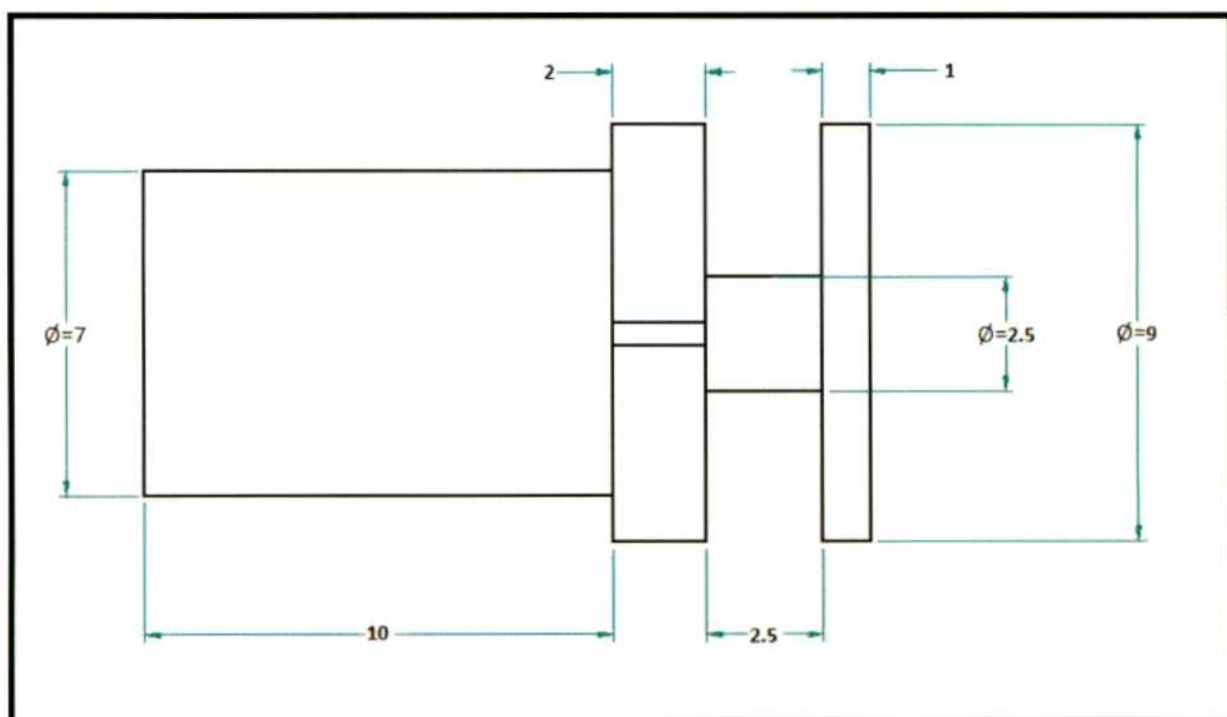


Figura 3.24. Plano para fabricación. Medidas en milímetros.

Se fabricaron 4 bobinas en total, con las medidas que se presentan en la Tabla 3.1, ver planos en el Apéndice 3. De las 4 bobinas, dos fueron empleadas como bobinas internas y las otras dos como externas. Al igual que con las sondas planas, éstas fueron utilizadas en modo diferencial con referencia externa con una pieza de referencia. Es decir: una recorre la pieza mientras que la otra se usa como referencia y se mantiene en una posición fija durante la inspección, sobre un tramo de tubo que se considera sano. Las bobinas 03 y 04 fueron utilizadas para las mediciones. Con las bobinas 01 y 02 resta realizar mediciones.

Se midió la impedancia de estas bobinas en función de la frecuencia con el equipo Solartron SI1260³⁵ y se calculó la inductancia ($L_o\text{ }_{\text{exper}}$) por cuadrados mínimos. Se realizaron dos series de mediciones por bobina y luego se realizó un promedio, cuyos resultados se presentan en la segunda columna de la Tabla 3.1. Los valores medidos y los gráficos para cada bobina se encuentran en el Apéndice 1. Las tres columnas siguientes presentan las dimensiones de las bobinas. El diámetro externo se midió sobre la bobina terminada, con un calibre marca Schwyz cuya menor división es 0,01 mm. Con estos valores y la expresión (3.1) se calculó la inductancia $L_o\text{ }_{\text{teórica}}$ de las bobinas (columna 6). Se observa que los valores de inductancia medidos son considerablemente mayores que los teóricos, por lo cual se analizó la validez de la fórmula aproximada empleada y se la cotejó con las propuestas por otros autores, calculando el valor de $L_o\text{ }_{\text{teórico}}$ para cada caso (columnas 7 y 8).

	$L_o\text{ }_{\text{exper}}$ [μHr] (E=0,2%)	d_{nominal} [mm]	$d_e\text{ }_{\text{medida}}$ [mm]	$\text{largo}_{\text{nominal}}$ [mm]	$L_o\text{ }_{\text{teórico}}$ Ec (3.1) Ref. Cecco [μHr]	$L_o\text{ }_{\text{teórico}}$ Ec (3.6) Community College [μHr]	$L_o\text{ }_{\text{teórico}}$ Ec (3.7) Ref. Surrey [μHr]
Bobina 01	375 ± 1	2	5,8 ± 0,1	2,5	142	426	362
Bobina 02	461 ± 1	2,5	6,5 ± 0,1	2,5	186	458	392
Bobina 03	477 ± 1	2,5	6,5 ± 0,1	2,5	186	458	392
Bobina 04	366 ± 1	2	5,8 ± 0,1	2,5	142	426	362

Tabla 3.1. Inductancia de las bobinas panqueque.

Primero se revisaron las condiciones de aplicación de la expresión (3.1). Una de las condiciones es la siguiente:

$$l = d_i = 0,2d_e$$

que en este caso particular no se cumple, dado que, como se ve en la Tabla 3.1,

$$l = 2,5\text{ }_{\text{mm}}$$

$$d_{i1} = 2\text{ }_{\text{mm}}$$

$$d_{i2} = 2,5\text{ }_{\text{mm}}$$

$$d_e \approx 6\text{ }_{\text{mm}}$$

El valor de d_e tendría que haber sido 12,5mm.

Se tomó de la bibliografía un par de ecuaciones más. Una de ellas, de la “Referencia Community College”³⁶, emplea la ecuación (3.6) (columna 7).

$$L = kN^2 \pi \mu_o \frac{[(r_o^2 - r_c^2) - \mu_r r_c^2]}{l} \quad (3.6)$$

donde:

r_o : radio medio de la bobina

r_c : radio del núcleo

l : longitud de la bobina

N : número de vueltas

μ_r : permeabilidad magnética de la bobina

μ_o : permeabilidad del vacío

k : constante adimensional, que contempla las propiedades geométricas como largo, diámetro interno y externo y el diámetro del alambre.

Esta referencia no menciona restricciones sobre los valores de r_o , r_c y l . La página web ofrece una rutina de cálculo, pero no da una fórmula para el valor de k . En la columna 7 se presentan los resultados de calcular L con (3.6) y $k=1$.

La otra ecuación es la propuesta por la “Referencia Surrey”³⁷. En esa referencia se presenta un análisis teórico para bobinas de multicapa con núcleo de aire, y emplea la ecuación (3.7), sin restricciones para la geometría (columna 8).

$$L = 4 \cdot 10^{-7} \pi a N^2 \left(\left(0,5 + \frac{\left(\frac{c}{2a} \right)^2}{12} \right) \ln \left(\frac{8}{\left(\frac{c}{2a} \right)^2} \right) - 0,84834 + 0,2041 \left(\frac{c}{2a} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

donde:

a : radio medio de la bobina

c : radio externo – radio interno de la bobina.

N : número de vueltas

Como se puede ver en la Tabla 3.1, si bien todos los valores nominales tienen el mismo orden de magnitud que los experimentales, y las ecuaciones (3.6) y (3.7) dan valores bastante aproximados, ninguna de ellas ajusta totalmente. Mediante (3.1) se obtienen valores por defecto, mientras que (3.6) ajusta bien la inductancia de las bobinas mayores y (3.7) la de las menores. La dependencia de la inductancia con el diámetro del núcleo y el radio medio de la bobina parece ser mayor que la considerada por las fórmulas.

El cálculo teórico que aproxime el valor nominal al real podría obtenerse mediante un modelado, pero esto no es el objetivo de este trabajo de tesis.

Por otro lado, entre las inductancias medidas con el equipo Solartron en los pares de bobinas similares se observa una diferencia mayor que el error experimental. Estas diferencias pueden provenir de varias causas:

- la tolerancia de fabricación del carretel, por lo cual d_i y la altura pueden diferir de los valores nominales,
- el proceso de bobinado: por la influencia de la tensión dada al alambre durante el bobinado (que podría deformar el núcleo), del capeado (distribución de las espiras) y como consecuencia, del diámetro externo.

Una vez construida la bobina, la única variable que se puede medir es el diámetro externo, ya que el diámetro interno y el largo, dependen de la forma en que se fabricó la bobina.

A pesar de que las bobinas tenían una inductancia mayor que la propuesta en el diseño, las mediciones de CI fueron satisfactorias.

3.1.3 Equipos utilizados

Las tres sondas se utilizaron conectadas a un equipo de corrientes inducidas basado en PC, el equipo modelo MAD8D de la firma Eddy Current Technology, Inc. de Richmond, Virginia. Tiene cuatro canales, de modo que permite trabajar con hasta cuatro frecuencias simultáneamente. En cada canal se puede seleccionar una frecuencia entre 55 Hz y 4 MHz. También se puede controlar la ganancia y fase de cada canal.

El equipo se utiliza con un software propio, que permite visualizar en la pantalla de la PC la señal de cada canal. La señal se puede visualizar en un plano complejo (plano de impedancia), o sus componentes en cuadratura como funciones del tiempo.

Las señales son muestreadas por el equipo con una frecuencia de muestreo que se puede elegir entre 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz y 8 kHz. La señal es digitalizada con 12 bits, tomando valores enteros en el rango de -2048 hasta 2047, que se corresponde con el rango de tensiones de -8 V a 8 V. Las señales se almacenan en archivos con un formato propio del software del equipo, que utiliza el formato hexadecimal. Para el procesamiento de las señales se desarrolló en el laboratorio un programa en el entorno MATLAB para leer esos archivos y transformarlos en matrices de números enteros en el rango de -2048 hasta 2047.

3.1.4 Diseño y construcción del dispositivo de ensayo

Para asegurar el correcto acople entre los sensores y el material, se diseñó un dispositivo que pudiera ser colocado dentro del tubo de dirección y que permitiera recorrer toda la circunferencia del tubo, asegurando una separación uniforme entre el sensor y la superficie a inspeccionar, Figura 3.25 a 3.29.

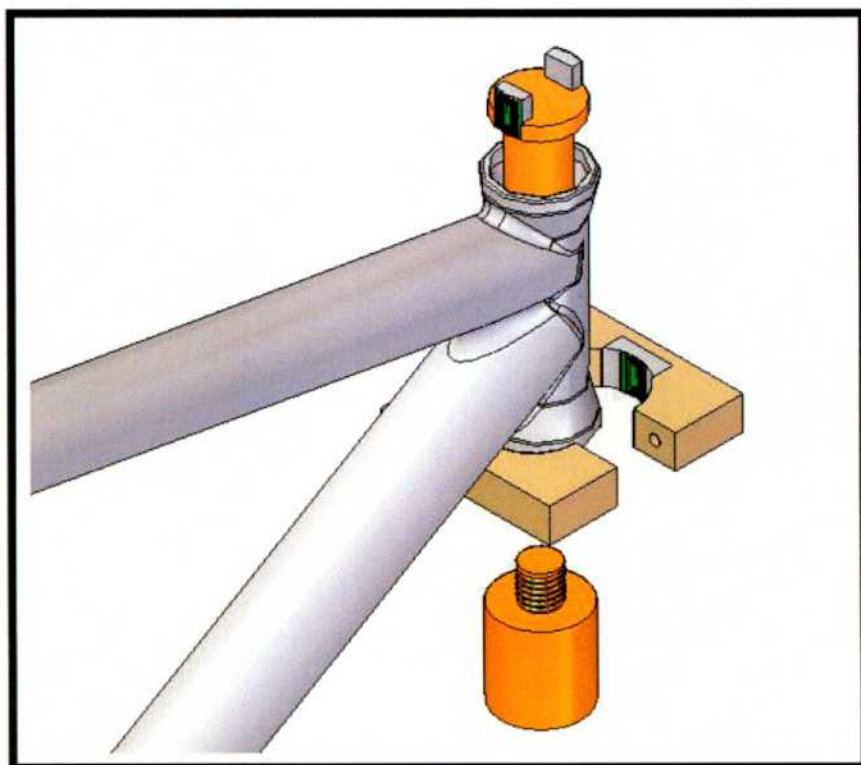


Figura 3.25. Dispositivo de medición montado en el tubo de dirección.

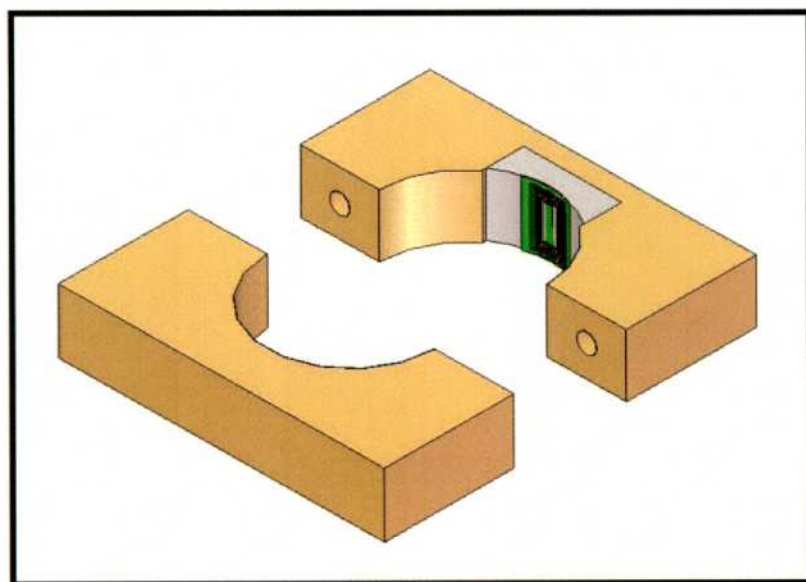


Figura 3.26. Soporte externo con la bobina de referencia.

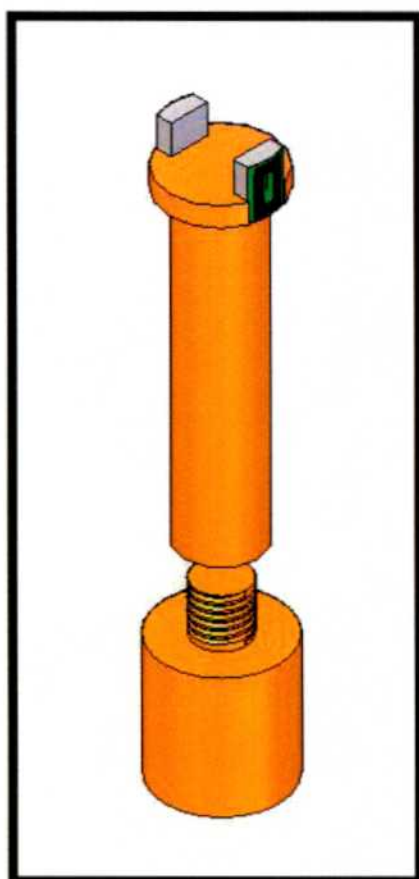


Figura 3.27. Soporte interno con la bobina de medición.

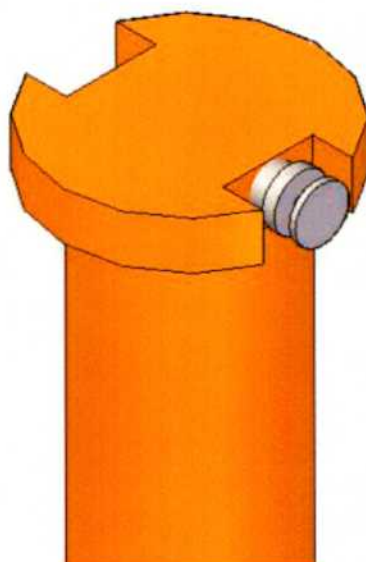


Figura 3.28. Soporte interno con la bobina panqueque.

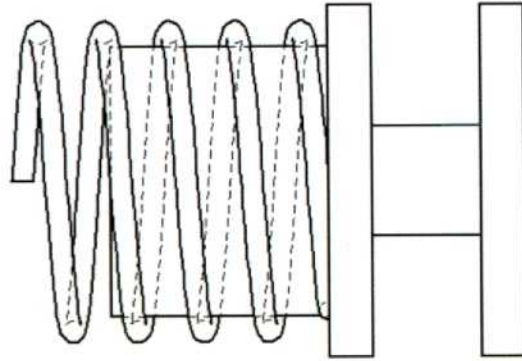


Figura 3.29. Bobina panqueque con resorte.

En la Figura 3.25 se puede observar el dispositivo colocado dentro del tubo de dirección. En la Figura 3.26 se muestra el soporte para la bobina externa, que se usa como referencia, sobre el extremo opuesto del tubo de dirección. La Figura 3.27 muestra el dispositivo con los sensores para medir sobre la cara interna del tubo. Una vez ubicado, todo el conjunto puede ser rotado en forma manual dentro del tubo de dirección, mientras se registran las señales con el equipo. En la Figura 3.28 se puede observar el mismo soporte interno, solo que ahora tiene la bobina palpador. La figura 3.29 muestra un detalle del resorte que se utilizó, para que la sonda vaya absorbiendo las variaciones ocasionadas producto del acople.

Los ensayos con las bobinas planas y las bobinas tipo palpador se hicieron a frecuencias que van desde 90 kHz a 720 kHz.

La Figura 3.30 muestra los dispositivos de ensayo montados.

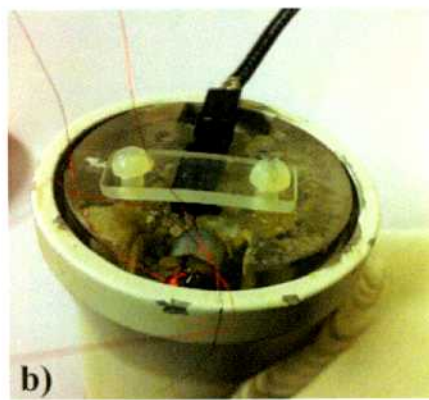


Figura 3.30. Dispositivos de ensayo montados. a) bobina plana montado en el tubo de dirección; b) bobina palpador montado en el tubo de dirección

4. Resultados y discusiones

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados más representativos obtenidos en este trabajo de tesis. La totalidad de los resultados se puede consultar en el Apéndice ubicado al final de esta tesis.

En el equipo modelo MAD8D fueron utilizadas las siguientes configuraciones:

- Configuración 1:

Canal	Frecuencia (kHz)	Fase	Ganancia	V/Div
1	400	106	55	0,25
2	800	152	30	0,13
3	720	111	25	0,13
4	360	152	30	0,13

Tabla 4.1 Configuración 1 - MAD8D

- Configuración 2:

Canal	Frecuencia (kHz)	Fase	Ganancia	V/Div
1	100	232	35	1
2	500	135	30	1
3	720	95	25	1
4	360	175	30	1

Tabla 4.2 Configuración 2 - MAD8D

- Configuración 3:

Canal	Frecuencia (kHz)	Fase	Ganancia	V/Div
1	100	232	35	1
2	200	220	30	1
3	180	225	25	1
4	90	240	30	1

Tabla 4.3 Configuración 3 - MAD8D

- Configuración 4:

Canal	Frecuencia (kHz)	Fase	Ganancia	V/Div
1	100	150	35	2
2	200	110	30	1
3	180	115	25	1
4	90	150	30	1

Tabla 4.4 Configuración 4 - MAD8D

Todas las mediciones realizadas se presentan en el Apéndice. En la Tabla 4.5 se presenta una selección de dichas mediciones, de las cuales solo vamos a analizar las más destacadas.

Medición	Configuración	Muestra	Bobina	Balanceo	Observación	Referencia
1	1	Patrón Zetec	Plana 03	aire		<u>0304010X</u>
2	1	Cuadro 03	Plana 03	aire		<u>0304011X</u>
3	1	Cuadro 03	Plana 03	aire	Lift-off menor	<u>0304012X</u>
4	1	Patrón Zetec	Plana 01	aire		<u>0103016X</u>
5	1	Patrón Zetec	Plana 01	pieza sana		<u>0103017X</u>
6	1	Patrón Zetec	Plana 01	aire	ídem medición 04	<u>0103018X</u>
7	1	Patrón Zetec	Plana 02	pieza sana		<u>0103019X</u>
8	1	Patrón Zetec	Plana 01	aire		<u>010301AX</u>
9	1	Patrón Zetec	Plana 01	pieza sana		<u>010301BX</u>
10	1	Patrón Zetec	Plana 01	pieza sana	ídem medición 09	<u>010301CX</u>
11	2	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	circ. completa	<u>010301DX</u>
12	2	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	circ. completa (ídem 11)	<u>010301EX</u>
13	3	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	circ. completa (ídem 11)	<u>010301FX</u>
14	3	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	1ra fisura	<u>0103030X</u>
15	3	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	2da fisura	<u>0103031X</u>
16	3	Cuadro 03	Plana 01	pieza sana	3ra fisura	<u>0103032X</u>
17	4	Cuadro 03	Palpador panqueque		circ. completa	<u>0104010X</u>
18	4	Cuadro 03	Palpador panqueque		1ra fisura	<u>0104011X</u>
19	4	Cuadro 03	Palpador panqueque		2da fisura	<u>0104012X</u>
20	4	Cuadro 03	Palpador panqueque		3ra fisura	<u>0104013X</u>
21	2	Patrón Zetec	Plana 01	aire		<u>0104140X</u>
22	2	Patrón Zetec	Plana 01	aire		<u>0104140X</u>
23	2	Patrón Zetec	Plana 01	aire	Ídem 21	<u>0104140X</u>
24	2	Patrón Zetec	Plana 01	aire	Idem 22	<u>0104140X</u>

Tabla 4.5 Mediciones Seleccionadas.

Lo que primero realizamos en esta tesis fue comprobar la medición de fisuras en un material como el Aluminio (material de los cuadros ensayados) de la pieza patrón, mostrada en la Figura 3.11. Los resultados obtenidos, Figura 4.1 y 4.2, corresponden a la utilización de bobinas planas, Figura 3.19. En la misma se observan

las tres fisuras artificiales de distinta profundidad de la muestra patrón, todas caracterizadas en la sección 3.1.2.1.1

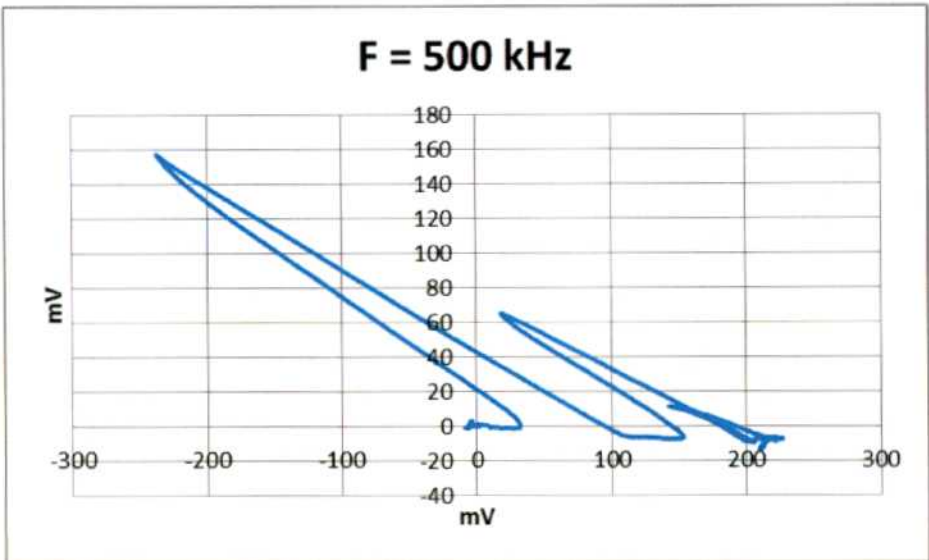


Figura 4.1 Pieza patrón Zetec con bobina plana (Medición 21 – Configuración 2 - Canal 2)

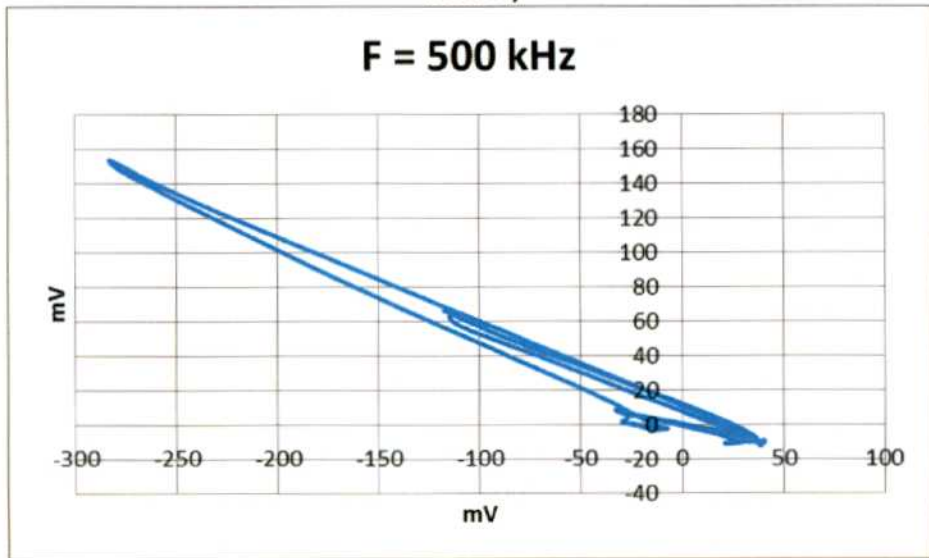


Figura 4.2 Pieza patrón Zetec con bobina plana (Medición 22 – Configuración 2 – Canal 2)

Ambas figuras, pertenecen al mismo patrón y fueron tomadas con la misma bobina. La única diferencia, es que cambia en 90° la orientación de la bobina sobre el patrón. Esta diferencia ocurre ya que la bobina plana es rectangular.

Una vez comprobado esto, se procedió a montar las bobinas planas en el dispositivo de ensayo descrito en la sección 3.13. Se realizaron mediciones con las bobinas planas y con las bobinas tipo palpador, sobre los defectos indicados en las Figuras 3.25 y 3.26. La Figura 4.3, detalla claramente las fisuras presentes en el Cuadro 3, Figura 1.4.

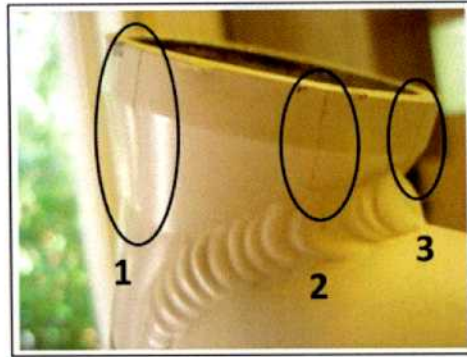


Figura 4.3 Cuadro 3, tubo de dirección fisurado.

En la medición 13 (Figura 4.4) se emplean bobinas planas. En la misma se observan tres picos bien diferenciados, cada uno de los cuales corresponde a una fisura.

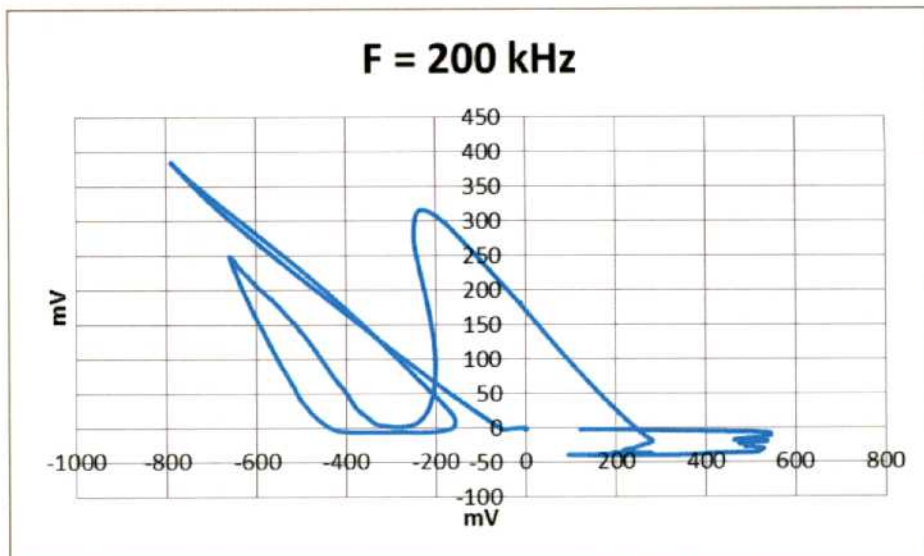


Figura 4.4 Cuadro 3 con sonda plana (Medición 13 – Configuración 3 – Canal 2)

También se midió por separado cada fisura, en forma similar al trabajo realizado anteriormente con la bobina Zetec, cuyos resultados fueron detallados en la sección 3.1.2.1.1 Figuras 3.12 a 3.15. La señal de la primera fisura medida con la bobina plana se detalla en la Figura 4.5, la de la segunda en la Figura 4.6 y la de la tercera en la Figura 4.7

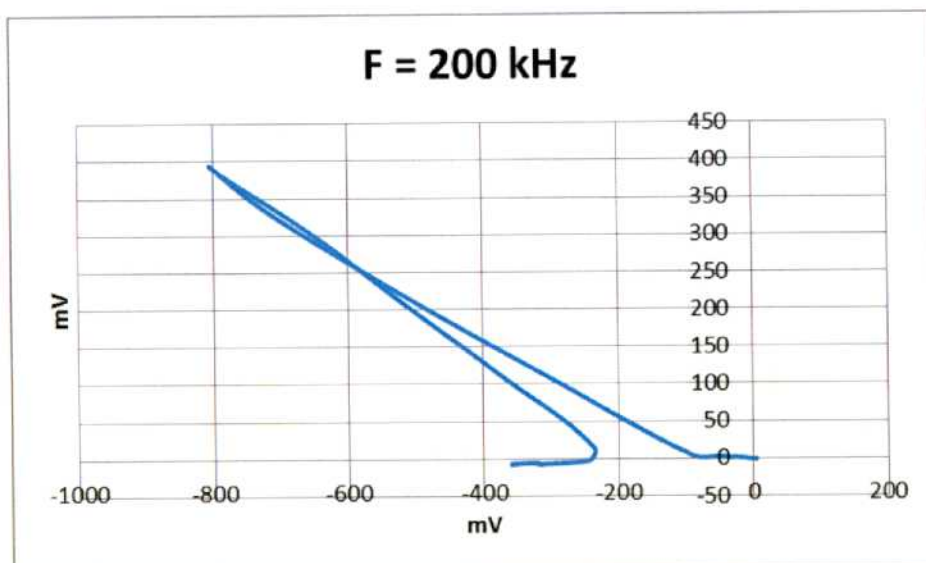


Figura 4.5 Fisura N°1 Bobina Plana (Medición 14 – Configuración 3 – Canal 2)

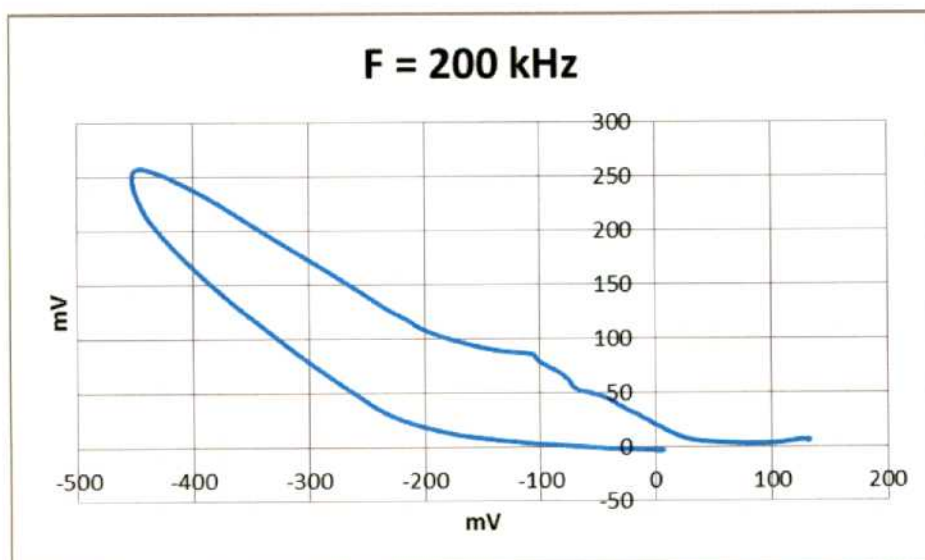


Figura 4.6 Fisura N°2 Bobina Plana (Medición 15 – Configuración 3 – Canal 2)

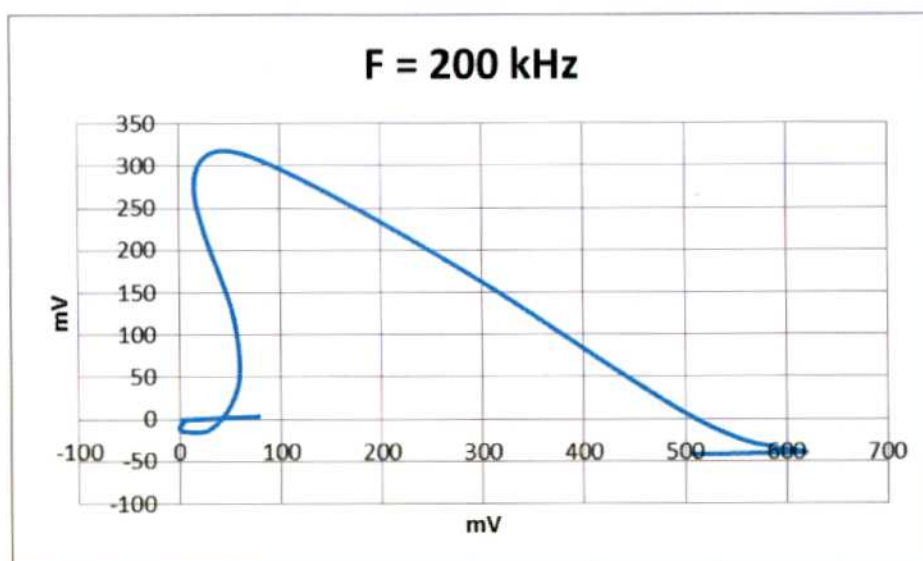


Figura 4.7 Fisura N°3 Bobina Plana (Medición 16 – Configuración 3 – Canal 2)

En la medición 17 (Figura 4.8) se emplean bobinas palpador panqueque. En la misma se observan tres picos bien diferenciados, de los cuales cada uno, corresponde a una fisura.

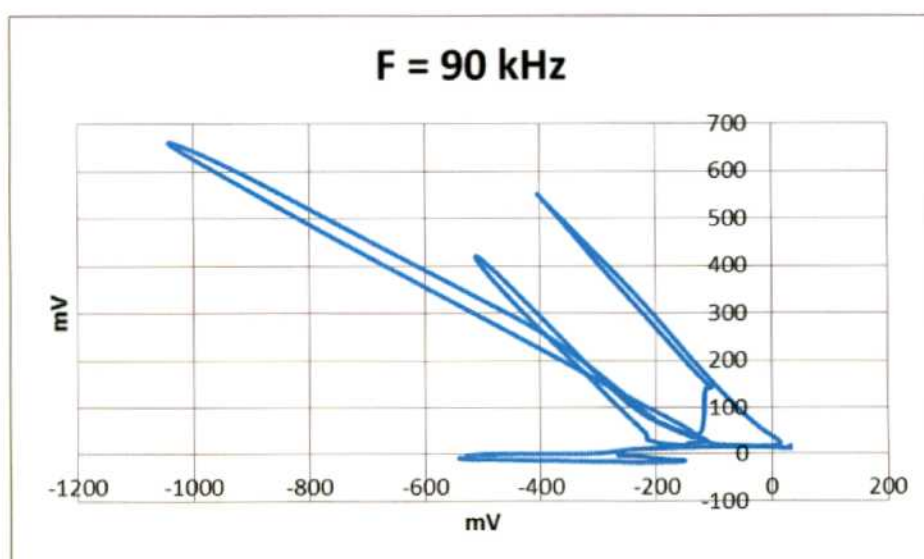


Figura 4.8 Cuadro 3 con Palpador Panqueque (Medición 17 – Configuración 4 – Canal 4)

Al igual que en el caso anterior también se midió cada fisura por separado. La indicación de la primera fisura medida con la bobina panqueque se detalla en la Figura 4.9, la de la segunda fisura en la Figura 4.10 y la de la tercera fisura en la Figura 4.11

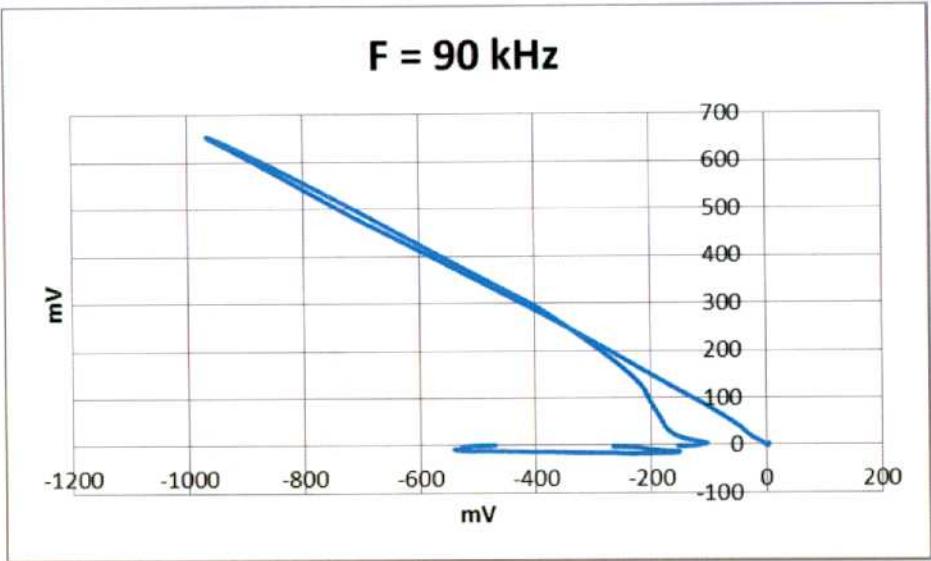


Figura 4.9 Fisura N°1 Panqueque (Medición 018 – Configuración 4 – Canal 4)

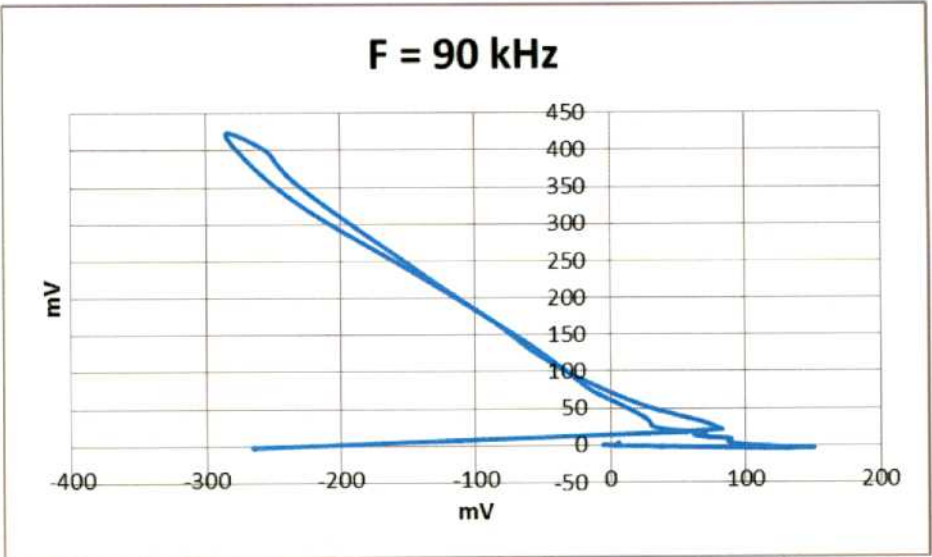


Figura 4.10 Fisura N°2 Panqueque (Medición 19 – Configuración 4 – Canal 4)

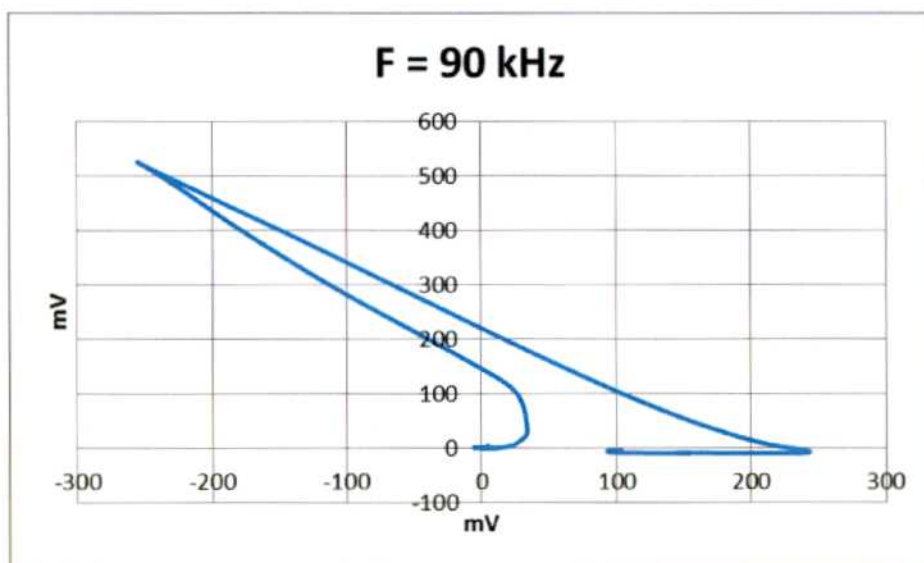


Figura 4.11 Fisura N°3 Panqueque (Medición 20– Configuración 4 – Canal 4)

Se observa una diferencia de apertura entre ambas indicaciones. La señal de la fisura 1, medida con la bobina plana, es muy delgada y limpia. La señal de la fisura 2, se comienza a detectar sobre el inicio del cordón de soldadura y finalmente la fisura 3, ya se encuentra afectada por el cordón de soldadura (ZAC: zona afectada por el calor).

El corrimiento entre el principio de la primera indicación y el final de la tercera, puede deberse a algún problema del acople o a que todavía el sensor se encuentra en la zona afectada por el calor.

La diferencia de ángulos entre la primera fisura en comparación con las fisuras 2 y 3, puede deberse a la cercanía del cordón de soldadura a las dos últimas.

El corrimiento entre inicio y fin de las mediciones obtenidas con las bobinas planas es mayor aun, debido a la mayor sensibilidad al lift-off que presentan estas bobinas en comparación con las palpador.

Una parte importante del trabajo desarrollado fue la optimización del dispositivo de medición. En efecto, en una primera etapa éste, fue diseñado para la utilización de las bobinas planas. La razón por la cual se eligieron estas bobinas se debió particularmente a su gran flexibilidad y versatilidad y al interés del departamento por estudiar su comportamiento en la detección de discontinuidades en aluminio. Las primeras mediciones no fueron del todo satisfactorias y se fueron realizando distintas modificaciones en el acople. En el transcurso de estas modificaciones, surgió la inquietud de fabricar una bobina palpador para poder adaptarla al dispositivo de medición, diseñado para las bobinas planas. Estas se fabricaron para obtener datos con los cuales comparar las mediciones anteriores y también para comprobar que en el dispositivo podían emplearse no solo sondas planas.

Luego de obtenidos los resultados preliminares con la bobina palpador, se modificó el acople mediante el empleo de un resorte. Se mejoró notablemente el acople de todo el conjunto bobina-dispositivo de medición y consecuentemente la calidad de las mediciones.

5. Capitulo Adicional

Este capítulo surge luego de las primeras recomendaciones realizadas por el jurado. A través del mismo vamos a tratar de profundizar ciertas cuestiones que inicialmente no fueron tratadas.

Para la industria aeronáutica y aeroespacial, la serie de aleaciones de aluminio más usual es la 7XXX.³⁸ Es una de las familias de aleaciones de aluminio que ofrecen mayor resistencia mecánica. De esta serie las específicas para uso aeroespacial son 7040, 7050, 7075, 7175, 7178 y 7475. Las mismas no tienen buena soldabilidad, pero sí muy buena maquinabilidad, debido a sus propiedades.³⁹ Justamente, con respecto a la soldabilidad, se considera que las aleaciones 7XXX de más de un 0.2% de cobre no se pueden soldar por fusión, mientras que sí es posible hacerlo con aleaciones que tengan un contenido de cobre menor al 0.2%. La aleación 7075 suele ser soldada por resistencia únicamente. En las bicicletas, esta aleación se usa para el plato palanca. De todas maneras, la aleación de nuestro interés, 7005, presenta buenas propiedades para ser soldada.

Dado que las piezas ensayadas fueron prestadas por un tiempo determinado, no se pudieron realizar ensayos de tipo destructivo sobre ellos, tales como metalográficos, análisis químicos y observaciones en los distintos tipos de microscopios que posee la Gerencia de Materiales de CNEA. Con la utilización de esas herramientas se puede determinar la estructura metalográfica, como así también la composición química de las muestras.

La inspección visual de los cordones de soldadura permite observar como principal diferencia entre las dos muestras que en el cuadro de aluminio Scott, la soldadura fue pulida. Asimismo se observan fisuras en el tubo de dirección de ambos cuadros y en el caño del asiento del cuadro Vairo. A fin de analizar en detalle la calidad de las soldaduras, se empleó otro método de ensayos no destructivos.

En el Laboratorio de Radiografía Industrial del ENDE se tomaron radiografías de ambas muestras para estudiar la calidad de los cordones de soldadura en las distintas uniones de los tubos. Las condiciones de ensayo pueden ser vistas en la tabla A1. Las dos primeras (Figura A1 y A2) pertenecen al cuadro de Scott (rojo y blanco) y la tercera y cuarta (Figura A3 y A4) pertenecen al cuadro Vairo (negro y blanco). La primera radiografía, figura A1, se tomó con un equipo Andrex 200 kV y placa tipo D7. Para las otras tres se aplicó la técnica de fluoroscopia por rayos X, que no utiliza placas, sino que procesa directamente imágenes digitales. En la tabla A1, se pueden ver las condiciones de ensayo para cada caso.

Para su presentación, la placa de la Figura A1 se digitalizó con un scanner General Electric FS50 para radiografía industrial. La figura A2 muestra la imagen por fluoroscopia de la misma zona. En ambas figuras, en la parte inferior, cerca de los indicadores de calidad de imagen, puede observarse una posible falta de fusión.

En la figura A3, se puede ver el dispositivo desarrollado en este trabajo montado en el tubo de dirección del cuadro Vairo. Además, se observan varias zonas con falta de fusión. En la figura A4, puede verse claramente una fisura en el caño de asiento, que posiblemente comenzó en la zona afectada por el calor entre ambos cordones y luego creció bordeando el cordón hacia el tubo superior. Esta fisura había

sido parcialmente detectada por inspección visual. También puede verse falta de contacto entre el tubo del asiento y la vaina superior.

	Equipo de Rx	Técnica	Voltaje [kV]	Amperaje [mA]	Distancia fuente-muestra [cm]	Cantidad de imágenes
Cuadro Scott	Andrex 200 kV	Rx con placa D7	70	2,5	70	Placa
Cuadro Scott	Philips 160 kV	Fluoroscopia	68	30	30	100
Cuadro Vairo	Philips 160 kV	Fluoroscopia	70	26	80	100

Tabla A1. Condiciones de ensayos radiográficos.

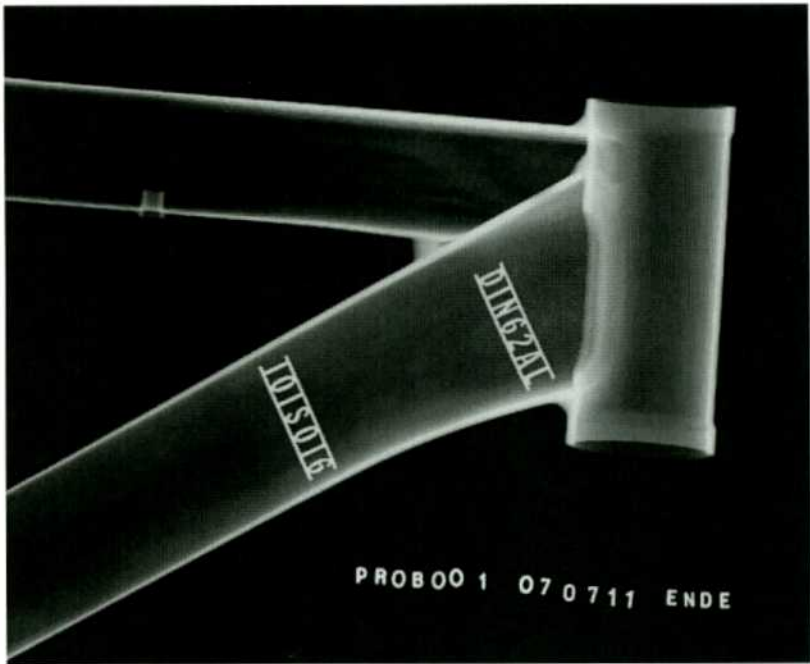


Figura A1 Radiografía de cuadro de Aluminio Scott, placa realizada con equipo Andrex 200 kV y luego digitalizada con scanner FS50 General Electric.

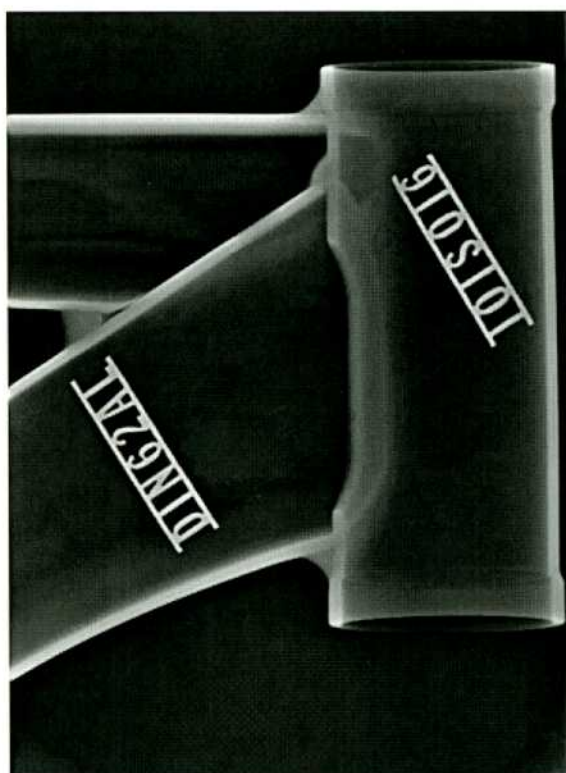


Figura A2 Radiografía de cuadro de Aluminio Scott foco en tubo de dirección, técnica: fluoroscopia. Se observa indicaciones de posibles faltas de fusión en algunas zonas del cordón de soldadura.

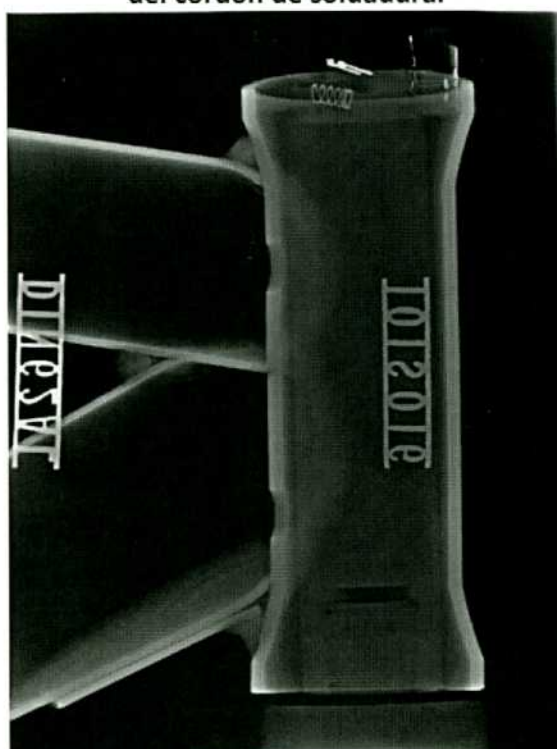


Figura A3. Radiografía de cuadro de Aluminio Vairo (tubo de dirección). Se observa el dispositivo de inspección por corrientes inducidas e indicaciones de posibles faltas de fusión en los distintos cordones de soldadura. Técnica: fluoroscopia

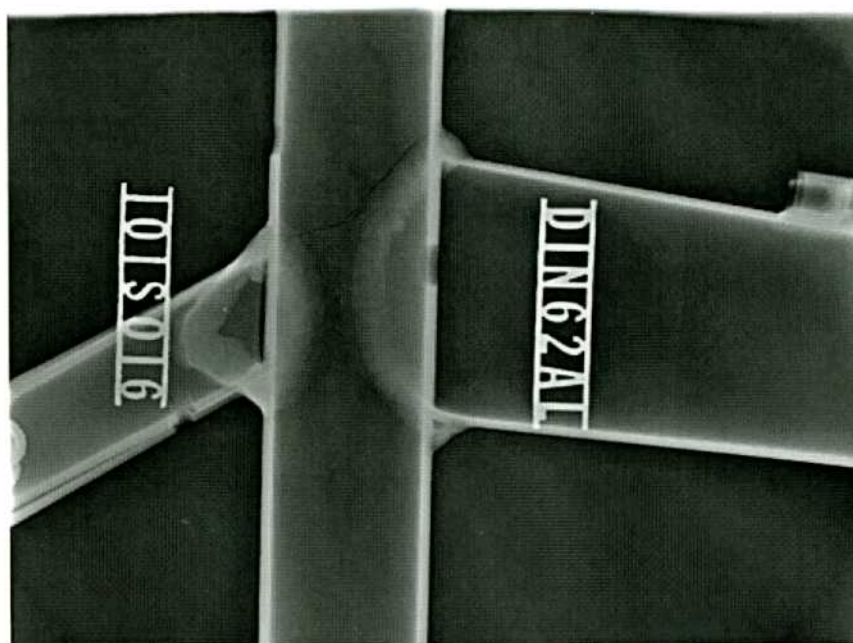


Figura A4. Radiografía de cuadro de Aluminio Vairo (inserción de caño de asiento). Se observa una fisura que posiblemente se inició en la zona afectada por el calor correspondiente al cordón de soldadura entre la vaina superior y el tubo del asiento y se propagó a lo largo del otro cordón hacia el tubo superior. Indicación de posible falta de unión entre vaina superior y tubo del asiento.

Por cuestiones de tiempo, ciertos temas no pudieron ser abordados. Con respecto a las fisuras encontradas en las piezas, a futuro se podría realizar una simulación de ensayos de fatiga, para determinar la distribución de tensiones en los cuadros, la relación entre los defectos en las soldaduras y las fisuras observadas y la velocidad de avance de éstas. Un estudio fractomecánico permitiría determinar la resistencia a la fractura del material. Justamente con una aplicación satisfactoria de la mecánica de fractura se puede demostrar que existen márgenes suficientes para una operación continua segura de un sistema.⁴⁰ Obviamente en un cuadro de bicicleta, bajo condiciones estáticas, no se va a producir ningún tipo de defecto. En especial, si es de aluminio, la probabilidad de que ocurra una fisura, va a ser debido a fatiga. La determinación del límite de fatiga de un material como el aluminio se debe realizar en laboratorio con probetas cuidadosamente mecanizadas. Diferentes factores tales como tensión media, medio ambiente y terminación superficial afectan la vida a la fatiga de los materiales. Wholer propuso un método mediante el cual se podría evitar este tipo de falla. La figura A5 muestra la vida a la fatiga en función de la tensión y su valor medio. Wholer encontró que manteniendo la amplitud de la tensión por debajo de un cierto nivel, la vida de un componente se hacía virtualmente infinita. Este valor fue llamado límite de fatiga y fue considerado una propiedad del material. En particular, los dos materiales más empleados para la fabricación de cuadros de bicicleta son el aluminio y el acero. En la figura A6, se puede ver que el aluminio, debido a sus propiedades, tiene un límite de fatiga bastante menor que el acero. Se define el límite de fatiga como aquel intervalo de tensiones donde un material puede llegar a experimentar una falla por fatiga. Como se ve claramente en la figura A6,

después de 10^5 ciclos el límite teórico de resistencia del acero es de 300 MPa. Esto quiere decir que, siempre que el acero no experimente una tensión mayor que 300 MPa, nunca va a sufrir una falla por fatiga. También podemos ver que la resistencia del aluminio desciende de manera continua. Por lo tanto los cuadros de bicicleta deben ser diseñados para que los mismos operen por debajo de este límite. Dado que el aluminio es un material propenso a que ocurra una falla por fatiga luego de un número finito de ciclos, el límite de fatiga es un dato muy importante a tener en cuenta a la hora de diseñar con este material.

La rotura por fatiga presenta tres etapas características:

- 1) Iniciación de la fisuración.
- 2) Propagación de la fisura.
- 3) Fractura.

La fractura es la etapa final y lleva a las condiciones terminales bajo una combinación de la tensión, la longitud de fisura, la geometría y la tenacidad del material. Un ensayo sobre una probeta de laboratorio finamente pulida es en gran parte un ensayo de resistencia a la iniciación de la fisuración (ver Figura A7). Pero en cambio, la mayoría de las estructuras contienen defectos tipo grieta introducidos durante la fabricación —especialmente si se usa soldadura - o los desarrollan en una etapa primaria de su uso; de tal manera que toda o casi toda su vida esta ocupada por el crecimiento de la fisura por fatiga.⁴¹

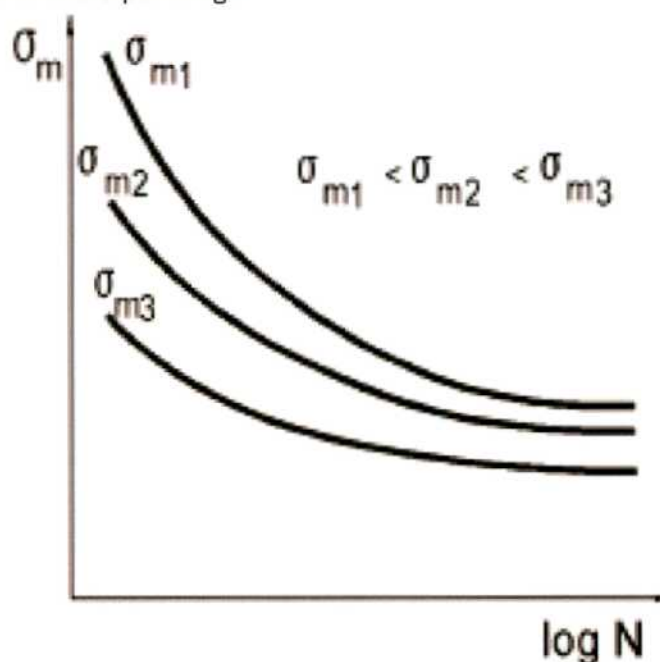


Figura A5. Curvas de Wohler. Efecto de la tensión media.⁴²

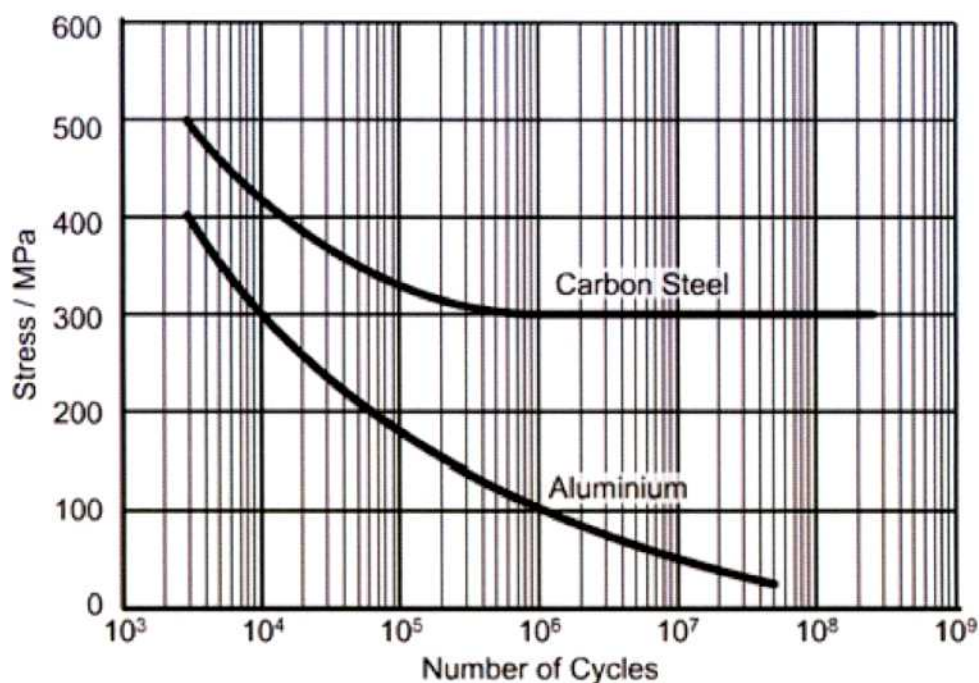


Figura A6. Limite de fatiga de Aluminio 6061 vs Acero. ⁴³

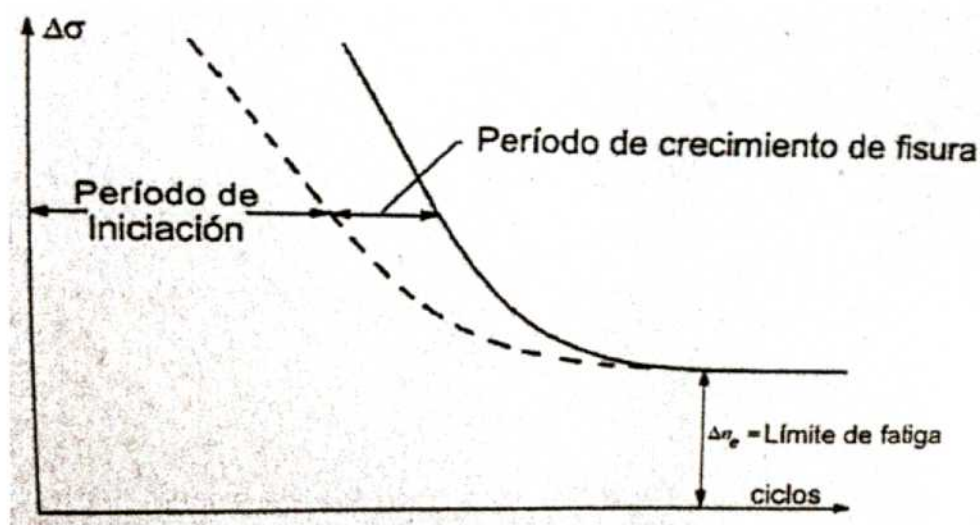


Figura A7 Curvas de Wohler con la iniciación indicada. ⁴⁴

A continuación, presentaremos los ensayos que de acuerdo a normas (ASTM F2043-09 y AENOR 14766, entre otras) se realizan en los cuadros de bicicleta.

Las normas ASTM F2843-10a, F2802-09, F2868-10 y F2614-09 definen para cada clase de bicicletas (Tabla A2) los requisitos de la carga cíclica que respectivamente deben soportar.

Condición	Tipo de uso	Carga cíclica de tracción [N]	Carga cíclica de compresión [N]	Nro de Ciclos
0	Bicicleta de niños	600	300	50.000
1	Camino pavimentado y liso	600	600	100.000
2	Camino no pavimentado y con imperfecciones	800	600	50.000
3	Caminos improvisados y saltos pequeños	1200	600	50.000
4	Uso extremo (fuera de pista)	Indefinido		

Tabla A2. Parámetros de ensayo ASTM F2043-09. ⁴⁴

Cada norma también remarca el número de ciclos que debe soportar la estructura para aprobar el ensayo. Cabe aclarar que, para la categoría llamada “Uso extremo, fuera de pista”, la norma no especifica los parámetros, ya que no se puede predecir hasta cuanto van a resistir. El tipo de cuadro estudiado en este trabajo corresponde, a la clase número tres. Cada una de las normas ASTM, referida a cada tipo de clase aclara también la velocidad de aplicación de las cargas.

Las fisuras por fatiga, pueden ser de dos tipos: por alto número de ciclos o bajo número de ciclos. De alto número de ciclos es aquella que ocurre desde 10^5 a 10^8 ciclos. Normalmente un ensayo con alto número de ciclos tiene una frecuencia de ensayo del orden de los 1000 Hz, haciendo imposible que sea ensayado en un cuadro de bicicleta. Un ensayo con bajo número de ciclos es aquel que ocurre en un rango de 10 a 10^5 ciclos. Estos tienen una frecuencia de ensayo del orden de 1Hz o incluso menor. Con lo antes mencionado, los ensayos de fatiga de un cuadro de bicicleta corresponden a ensayos con un bajo número de ciclos. Esta frecuencia de ensayo es la representación más aproximada de la carga de fatiga que un cuadro experimenta en la vida real.⁴⁴

La norma AENOR 14766 exige 5 ensayos completos del cuadro.⁴⁵ Tres son ensayos de fatiga y dos son de impacto. Las condiciones de ensayo, en cuanto a carga y número de ciclos del mismo, va a depender del tipo de uso al cual apunta el modelo de bicicleta. Luego de realizar cualquiera de los cinco ensayos, se podría emplear el dispositivo diseñado en este trabajo para alertar sobre la presencia, o no, de una fisura incipiente.

Los ensayos que se realizan específicamente al cuadro son cinco:

- 1) Conjunto cuadro y horquilla delantera. Ensayo de choque (caída de una masa).
Figura A8

Se coloca en la horquilla un rodillo delantero que tenga una masa inferior o igual a 1 kg y de dimensiones conformes a las indicadas en la figura A8. Si se utiliza una tija de acero en lugar de la horquilla, la tija debe tener un extremo redondeado, cuya forma sea equivalente a la del rodillo. Se aprieta el conjunto cuadro-horquilla o cuadro-barra en posición vertical en un dispositivo de fijación rígida, utilizando los puntos de fijación del eje trasero como se muestra en la figura A8.

Se coloca un percutor que tenga una masa de 22,5 kg sobre el rodillo colocado en las punteras de la horquilla o sobre la extremidad redondeada de la tija maciza y se mide la distancia entre ejes. Se levanta el percutor a una altura de 360 mm por encima del rodillo y de la pequeña masa y se le suelta para que percuta al rodillo o a la tija de acero en un punto alineado con los centros de las ruedas y contra la dirección de inclinación de la horquilla o de la tija. El percutor va a rebotar, lo que es normal. Cuando el percutor se detiene sobre el rodillo o la tija maciza, se mide de nuevo la distancia entre ejes.

Después de este ensayo, no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistemas de suspensión.

La deformación permanente medida entre los centros de los ejes de rueda no debe sobrepasar 30 mm cuando la horquilla está montada.⁴⁶

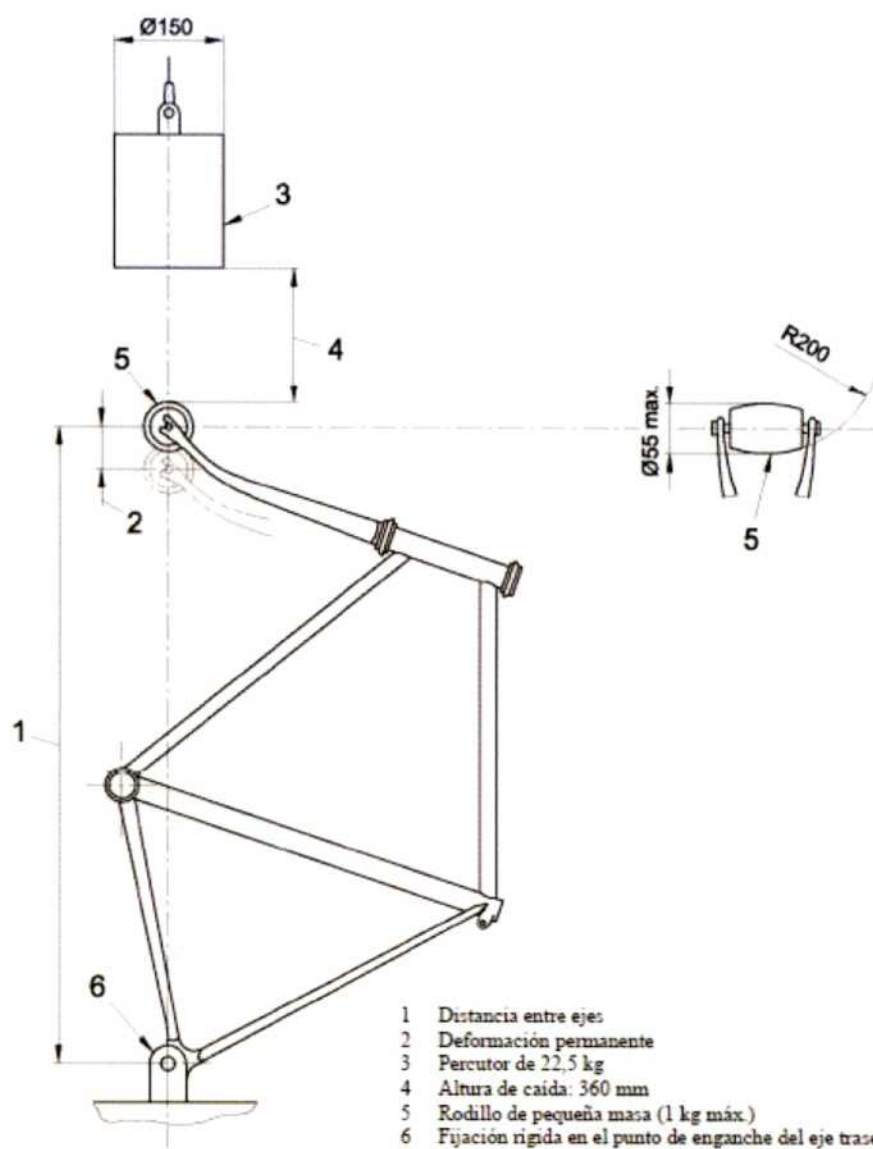


Figura A8 Conjunto cuadro y horquilla delantera. Ensayo de choque (caída de una masa).⁴⁶

2) Conjunto cuadro y horquilla delantera: Ensayo de choque (caída de un cuadro).
Figura A9

Como se muestra en la figura A9, se fija el conjunto cuadro/horquilla por los puntos de fijación del eje trasero para que sea libre de girar alrededor del eje trasero en un plano vertical. Se coloca la horquilla delantera sobre un yunque liso de acero para que el cuadro esté en su posición normal de utilización. Se fijan sólidamente las masas de 10 kg, 30 kg y 50 kg respectivamente a la parte superior del tubo de eje de horquilla, a la tija de sillín y a la caja de pedalier como se muestra en la figura A9.

Se mide la distancia entre ejes con las tres masas colocadas. Se hace girar el conjunto alrededor del eje trasero hasta que la distancia entre el rodillo de pequeña masa y el yunque sea de 300 mm, después se suelta el conjunto para que caiga libremente sobre el yunque.

Se repite el ensayo y después se mide de nuevo la distancia entre ejes con las tres masas en su lugar y el rodillo posado sobre el yunque. Como consecuencia de este ensayo, no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto, la deformación permanente medida entre los centros de los ejes de las ruedas no debe sobrepasar 60 mm para un conjunto cuadro/horquilla y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento del sistema de suspensión.⁴⁶

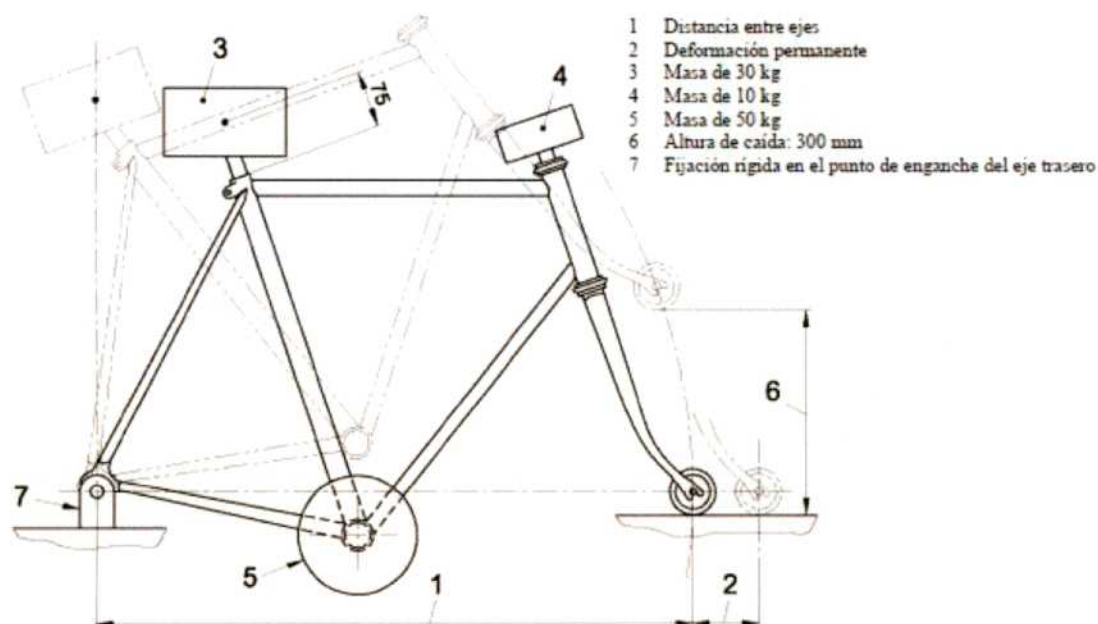


Figura A9 Conjunto cuadro y horquilla delantera: ensayo de choque (caída de un cuadro).⁴⁶

3) Cuadro. Ensayo de fatiga con las fuerzas de pedaleo. Figura A10

Se monta el conjunto cuadro-horquilla sobre una base como se muestra en la figura A10 con la verdadera o la falsa horquilla fijada por su eje a un dispositivo de fijación de radio R_w (igual al radio del conjunto rueda/neumático ± 30 mm) y que permite al cubo oscilar alrededor de su eje. Se fijan los brazos traseros, por medio de un eje a una unión vertical rígida que tiene la misma altura que el dispositivo rígido delantero de fijación, estando libre la parte superior para oscilar alrededor del centro del eje, pero garantizando una rigidez en un plano lateral y estando provista la extremidad inferior de la unión de una junta esférica. Se instala un conjunto biela, plato y cadena o, de preferencia, un conjunto de sustitución rígido y resistente, en la caja de pedalier como se muestra en la figura A10.

Se somete cada eje de pedal (o componente de ensayo equivalente) a una fuerza repetida, de 1200 N en un punto situado a 150 mm del eje del cuadro en un plano transversal vertical y con una inclinación de $7,5^\circ$ (precisión de $\pm 0,5^\circ$) respecto al plano longitudinal del cuadro. Durante la aplicación de estas fuerzas de ensayo, se verifica que la fuerza sobre un “eje de pedal” ha descendido al 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar a aplicar la fuerza de ensayo al otro “eje de pedal”. Se aplican las fuerzas de ensayo durante 100 000 ciclos de ensayo.

Durante este ensayo efectuado no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en el marco y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento del sistema de suspensión.^{viii}

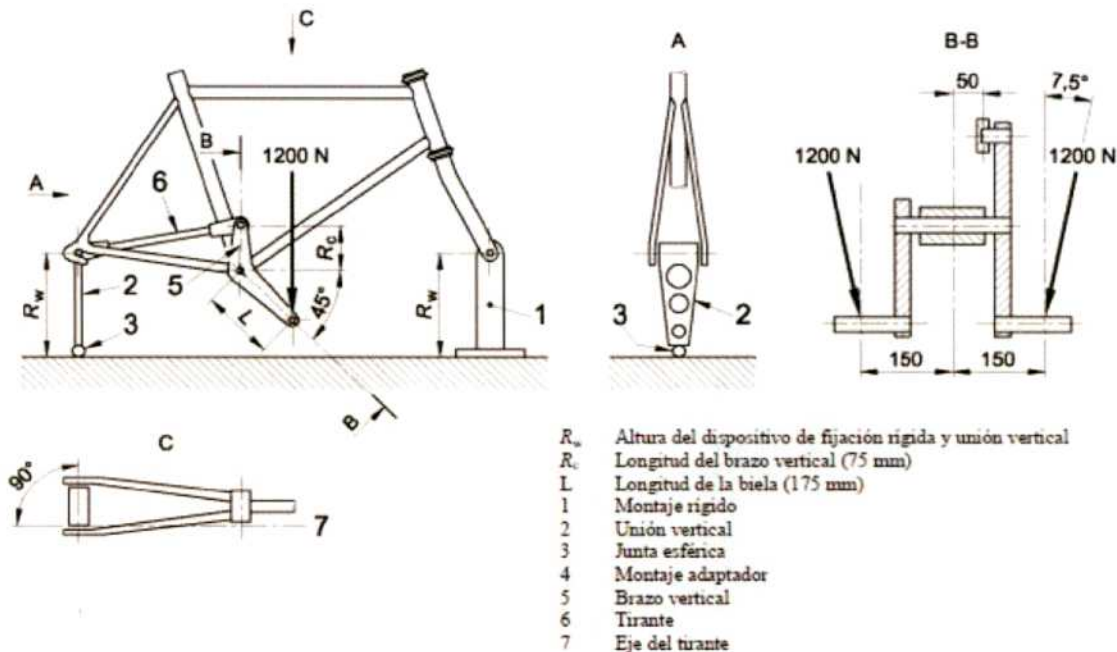


Figura A10 Cuadro. Ensayo de fatiga con las fuerzas de pedaleo.⁴⁶

4) Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. Figura A11

Se instala el cuadro en su posición normal fijándolo al nivel de sus patas traseras de tal forma que no esté limitado en su rotación (es decir, de preferencia por el eje trasero) como se muestra en la figura A11. Se verifica que los centros de los ejes delantero y trasero estén alineados en el plano horizontal.

Se aplican ciclos de fuerzas dinámicas horizontales de +1200 N hacia delante y de -600 N hacia atrás en las punteras de la horquilla delantera durante 50 000 ciclos, como se muestra en la figura A11 con la horquilla delantera bloqueada según la dirección vertical, pero con libertad para desplazarse en la dirección longitudinal bajo el efecto de las fuerzas aplicadas. La frecuencia máxima debe ser de 25 Hz.

Durante este ensayo no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en el cuadro y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento de los sistema de suspensión.^{viii}

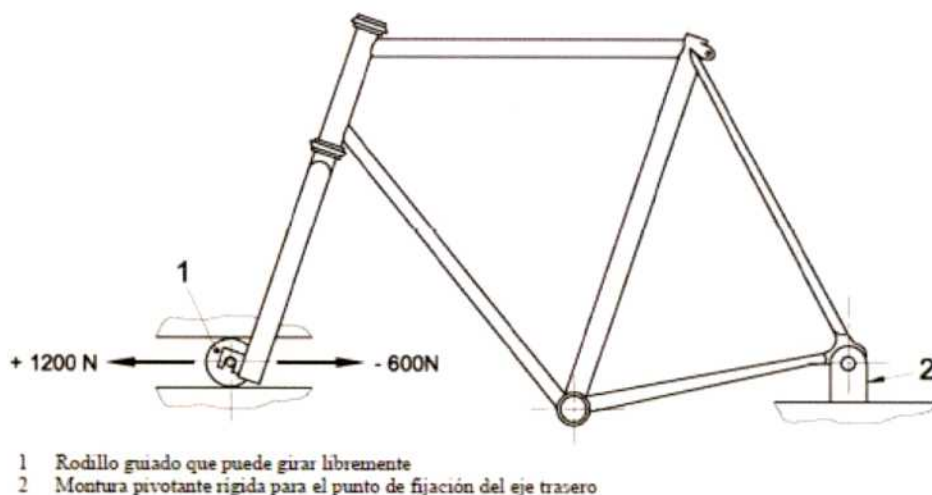


Figura A11 Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales.⁴⁶

5) Cuadro. Ensayo de fatiga por fuerzas verticales. Figura A12

Se instala el cuadro en su posición normal, fijándolo a las punteras traseras, de tal forma que no esté limitado en su rotación (es decir, de preferencia por el eje trasero) como se muestra en la figura A12. Se instala un rodillo apropiado en el eje delantero para permitir al cuadro flexionar en el sentido longitudinal bajo el efecto de las fuerzas de ensayo.

Se introduce una tija maciza redonda de acero equivalente a una tija de sillín en la parte superior del tubo de sillín a una profundidad de 75 mm y se fija con la ayuda del dispositivo de sujeción normal y según las instrucciones del fabricante. Se fija rígidamente una extensión horizontal dirigida hacia atrás (E en la figura A12) a la parte superior de esta tija de tal forma que su longitud (dimensión h sobre la figura A12) coloca el punto H en una posición equivalente a la del centro del bastidor del sillín cuando la bicicleta está ajustada a la altura máxima de sillín recomendada para el

cuadro en cuestión; o si no se dispone de la información sobre la altura máxima del sillín, h debe valer 250 mm. Se aplican ciclos de fuerza dinámica verticales de 0 a + 1 200 N en un punto situado a 70 mm detrás de la intersección de los ejes de la tija maciza de acero y de la extensión, E , como se muestra en la figura A11, durante 50 000 ciclos de ensayo con una frecuencia de ensayo inferior o igual a 25 Hz.

Durante este ensayo, no debe haber ninguna fisura ni rotura visible en el cuadro y no debe haber ninguna separación de cualquier elemento del sistema de suspensión.⁴⁶

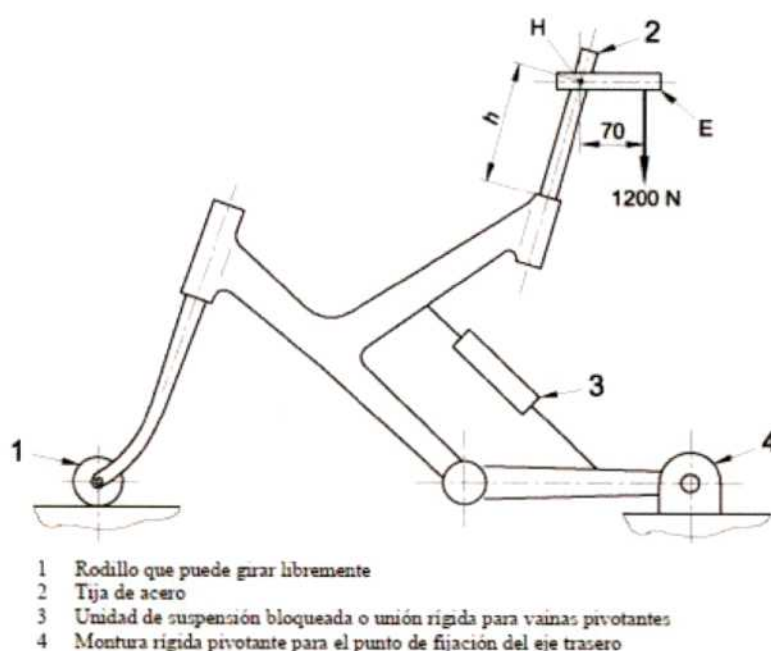


Figura A12 Cuadro. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical.⁴⁶

Como se mencionó en cada caso, luego de realizado cada uno de estos ensayos, la norma exige que no haya ninguna fisura ni rotura visible en el conjunto. Es por eso que sería recomendable utilizar el dispositivo diseñado en este trabajo, para determinar la presencia de posibles fisuras. Cabe aclarar que para montar el dispositivo, se debe desacoplar el conjunto horquilla-juego de dirección del cuadro. En la figura A13, se puede ver un diagrama de corte del todo el conjunto armado.

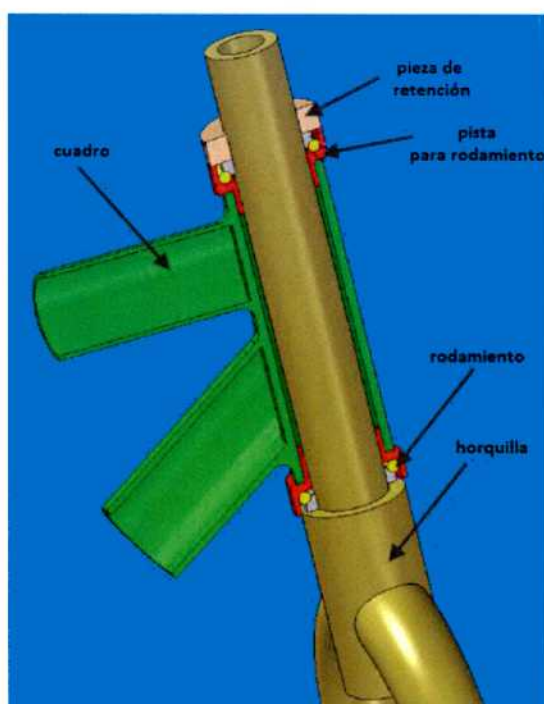


Figura A13. Corte del conjunto cuadro-horquilla.⁴⁶

Con respecto a las causas de fisuración en un cuadro de aluminio 7005, vamos a citar un trabajo de la revista "Engineering Failure Analysis".⁴⁷

En el mismo, la muestra analizada es un cuadro de Mountain Bike de aluminio de aleación 7005. Se estima que el mismo fue utilizado por más de 35.000 km. En el mismo, se presentaron diversas fisuras en varias partes del cuadro. Cabe aclarar que esta bicicleta fue utilizada en una región de la costa norte de España y las condiciones climáticas jugaron un papel importante. Es un ambiente salino con las siguientes condiciones: humedad relativa del 80% a lo largo de todo el año, precipitaciones de 1200-1300 mm/año y puede llegar a llover de 150-180 días al año.

Los autores cortaron diferentes muestras de distintas partes del cuadro. Con las mismas se realizaron probetas, que fueron pulidas y observadas al microscopio. En la figura A14, se pueden ver dos probetas de la zona soldada. La primera pertenece a la unión entre el caño de asiento y el tubo inferior y la segunda al caño de asiento y las vainas traseras.



Figura A14. Probetas de un cuadro de Aluminio 7005.⁴⁸

Estas muestras, fueron observadas al microscopio, figura A15 y A16. Como puede verse en la figura A15, la misma presenta una gran cantidad de precipitados. Esto ocurre normalmente en un tratamiento de endurecimiento por precipitación llamado T6, que fue descrito en la sección 1.2.1. También podemos ver que hay dos tamaños distintos de precipitados, unos más grandes, del orden del micrómetro y otros más pequeños, que aparecen en la figura como puntos pequeños; su tamaño es del orden del nanómetro. Todos estos precipitados tienen su origen en el tratamiento térmico de envejecimiento en el cual el material como dijimos anteriormente tiende a desarrollar un endurecimiento por precipitación. Mientras la segunda figura, A16, tiene un contenido bastante menor de precipitados. Esto se debe, básicamente, a que el material de aporte utilizado para soldar pertenece a las serie 5xxx, que son AA 5180, AA 5183 y AA 5356, donde el Mg es el mayor aleante. Estas aleaciones no son tratables térmicamente, por lo tanto no van a desarrollar un endurecimiento por precipitación. Cuando estas aleaciones presentan un contenido de Mg mayor al 3%, resulta en una solución de Mg sobresaturada, donde el Mg tiene a precipitar en borde de grano, para lograr un equilibrio con la fase β (Mg_5Al_8). Finalmente la figura A17 muestra la microestructura encontrada en ciertos lugares del material base de la zona afectada por el calor (ZAC). Durante el procedimiento de soldadura y el tratamiento térmico posterior, la microestructura del material base se puede llegar a modificar y generar una microestructura típicamente dendrítica con dos fases bien diferenciadas.

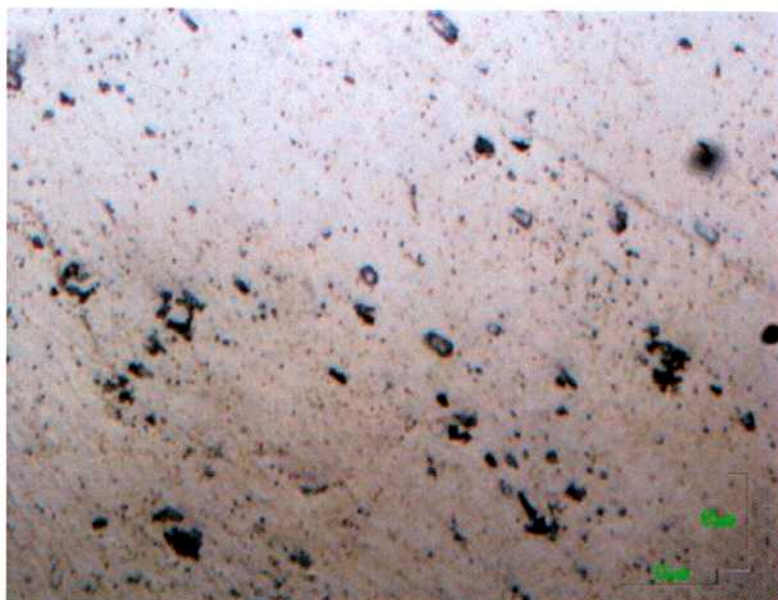


Figura A15. Microestructura del material base de los tubos de Aluminio 7005. ⁴⁸



Figura A16. Microestructura en la zona de soldadura de los tubos de Aluminio 7005.

48

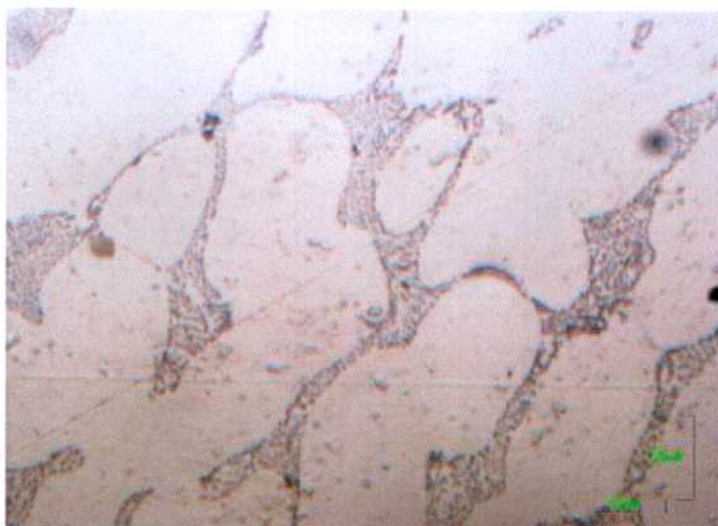


Figura A17. Microestructura encontrada en ciertos lugares del metal base de la zona afectada por el calor.⁴⁸

Dichos autores también realizan una caracterización mecánica de estas mismas probetas, en la cual se van a diferenciar tres zonas:

- 1) Material soldado.
- 2) Zona afectada por el calor.
- 3) Material base.

En la figura A18, se muestra un análisis de microdureza Vickers. Este revela que el material soldado, presenta una microdureza menor que el resto. Esto es algo común en el aluminio, donde la tensión de fluencia del material soldado es menor que la tensión de fluencia del material base.⁴⁸ El material soldado, no está sometido a ningún tratamiento térmico, por lo tanto no sufre ningún endurecimiento por precipitación. También en la figura A19, podemos ver el perfil de durezas que experimenta un aluminio 6061, también utilizado para la fabricación de cuadros de bicicleta.

El Aluminio 7005 presenta valores de microdureza de alrededor 75 HV1 cuando no ha sido sometido a ningún tratamiento térmico. Sin embargo, los valores obtenidos en los tubos son más altos que 90 HV1, cerca a 120 HV1 en algunos puntos y el valor promedio es cercano a 100 HV1. Estos valores, a pesar de ser menores, corresponden al aluminio 7005 luego de ser sometido a tratamientos térmicos como T6, T63 y T6531 (106 HV1 según⁴⁹) Por lo tanto, se confirma que el material se ha endurecido por precipitación.

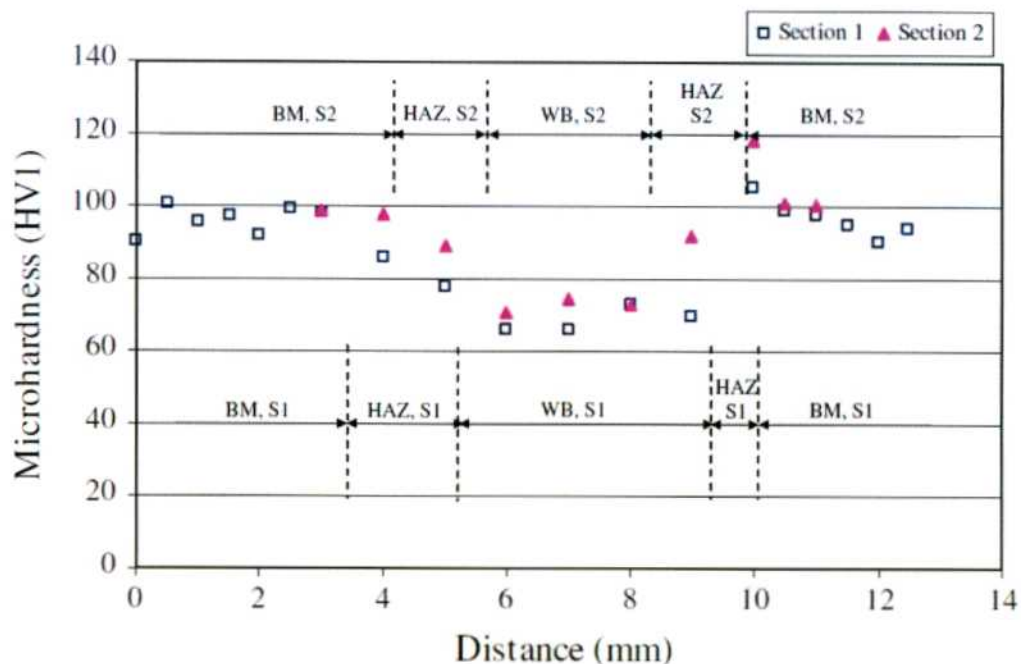


Figura A18. Microdureza obtenidas de las dos probetas ensayadas.

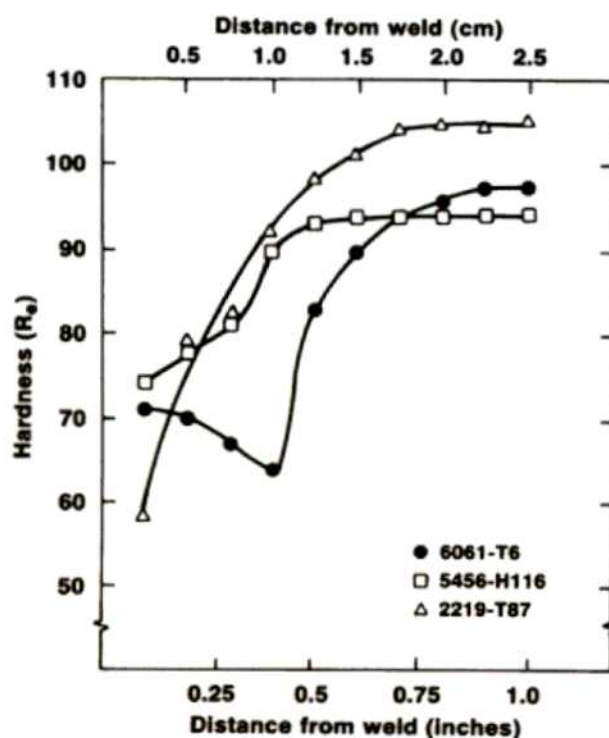


Figura A19. Dureza Rockwell C para distintos aluminos.⁵⁰

Por último, las fisuras fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM), para poder determinar los mecanismos de fisuración. La figura A20, muestra el aspecto de la mayoría de la superficie, con una evidente propagación

intergranular. Esto quiere decir que ha ocurrido el proceso conocido como corrosión bajo tensiones.

Como citamos anteriormente, el aluminio de la serie 7xxx es propenso a sufrir este tipo de fenómeno. Para que esto ocurra, debemos tener lo siguiente: un material susceptible a esto; un ambiente agresivo (corrosivo) y estar sometido a tensión. El material es susceptible a corrosión bajo tensiones debido a la diferencia entre el potencial de disolución del material base y de los precipitados. La fase (MgZn_2), correspondiente a los precipitados, se origina durante el tratamiento de envejecimiento, con un potencial de disolución de $-1,05\text{ V}$, mientras que aluminio 7005 tiene un potencial de disolución de $-0,85\text{ V}$. De esta manera, las partículas precipitadas son altamente anódicas a la matriz y se pueden disolver fácilmente en un ambiente conductor. En el caso de un material demasiado viejo, la situación es muy similar, dado que el correspondiente precipitado (Al-Zn-Mg) también tiene un comportamiento anódico (por ejemplo, el contenido de Zn de más de 3% produce un potencial de solución de $-1,07\text{ V}$. Por otra parte, el esperado Al_8Mg_5 que precipita en la soldadura tiene un potencial de $-1,15\text{ V}$, mientras que la serie 5xxx tienen potenciales en el orden de $-0,78\text{ V}$. En la figura, está marcado con flechas las evidencias de disolución en límite de grano, lo cual confirma la aparición de este fenómeno, debido a la presencia de precipitados con comportamiento anódico.

El ambiente agresivo va a estar determinado por el lugar donde sea empleada la bicicleta. En este caso particular, la misma se utilizó en un ambiente salino, la costa de un mar.

Y por último, la presencia de las tensiones: van a estar dadas por las tensiones residuales de la soldadura y por el uso diario del cuadro. Justamente, las fisuras se inician siempre en una zona cerca al cordón de soldadura.

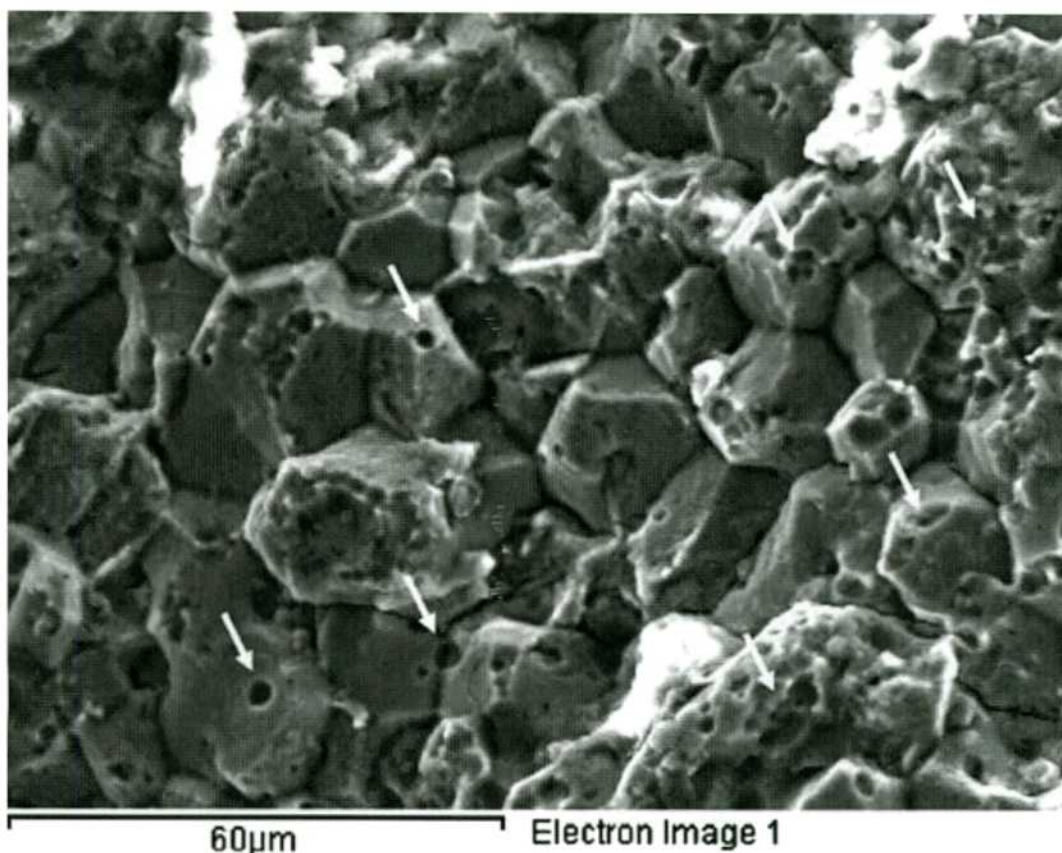


Figura A20. Imagen obtenida en el SEM, donde muestra la superficie de fractura, con la propagación de la misma.

Para este tipo de situaciones, es muy común realizar simulaciones por elementos finitos (MEF). En el mismo, uno puede simular cargas por fatiga, para predecir en que zonas, el cuadro es mas propenso a experimentar este tipo de falla. Simular un ensayo por fatiga, es una tarea realmente complicada. Se requiere de un muy buen manejo del software, como así también una buena interpretación de los datos obtenidos. Por lo tanto vamos a citar un caso realizado en un trabajo del Instituto Politécnico de Worcester⁴⁵. Primero, se realiza un mallado del modelo (figura A21) donde el número de nodos va a ser mayor, en el lugar mas crítico del modelo. En este caso, podemos ver que en la zona del tubo de dirección, como así también las zonas de unión del tubo superior e inferior con el tubo de dirección presentan la mayor cantidad de nodos. Luego de realizar el mallado, se procede a la simulación y se obtienen resultados como los que muestran la figura A22. Con color rojo, se denotan los puntos más críticos. Estos son los lugares más propensos a que ocurra una falla por fatiga. En la figura A23, se observa la simulación por elementos finitos y los ensayos realizados en laboratorio con la muestra real.

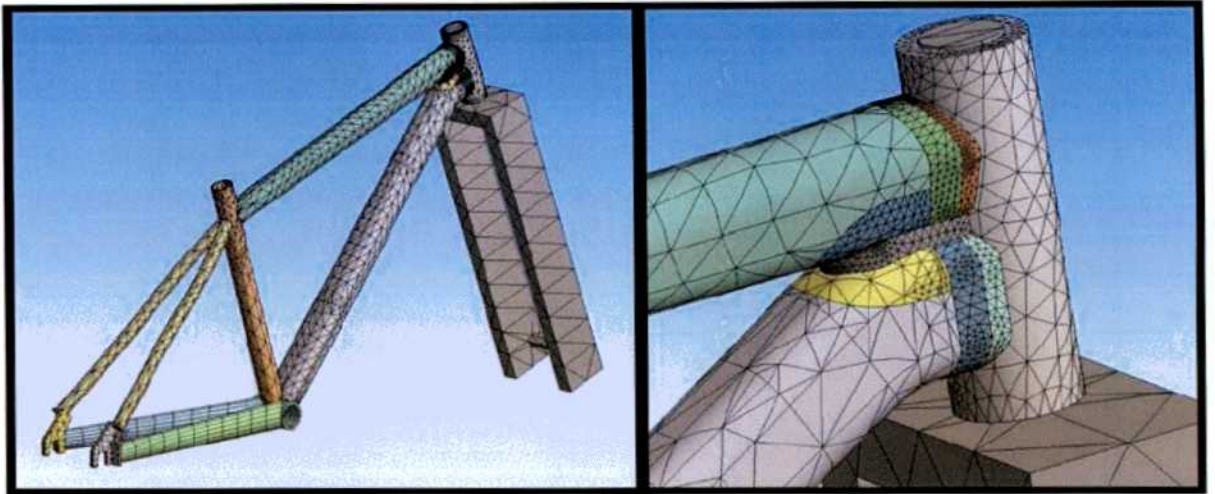


Figura A21. Mallado del modelo a estudiar.

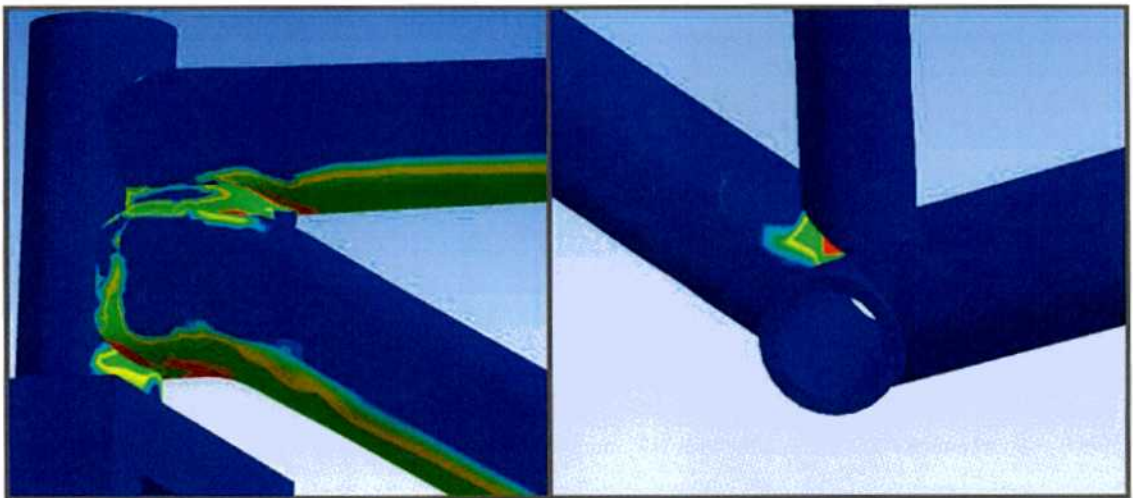


Figura A22. Simulación por elementos finitos.

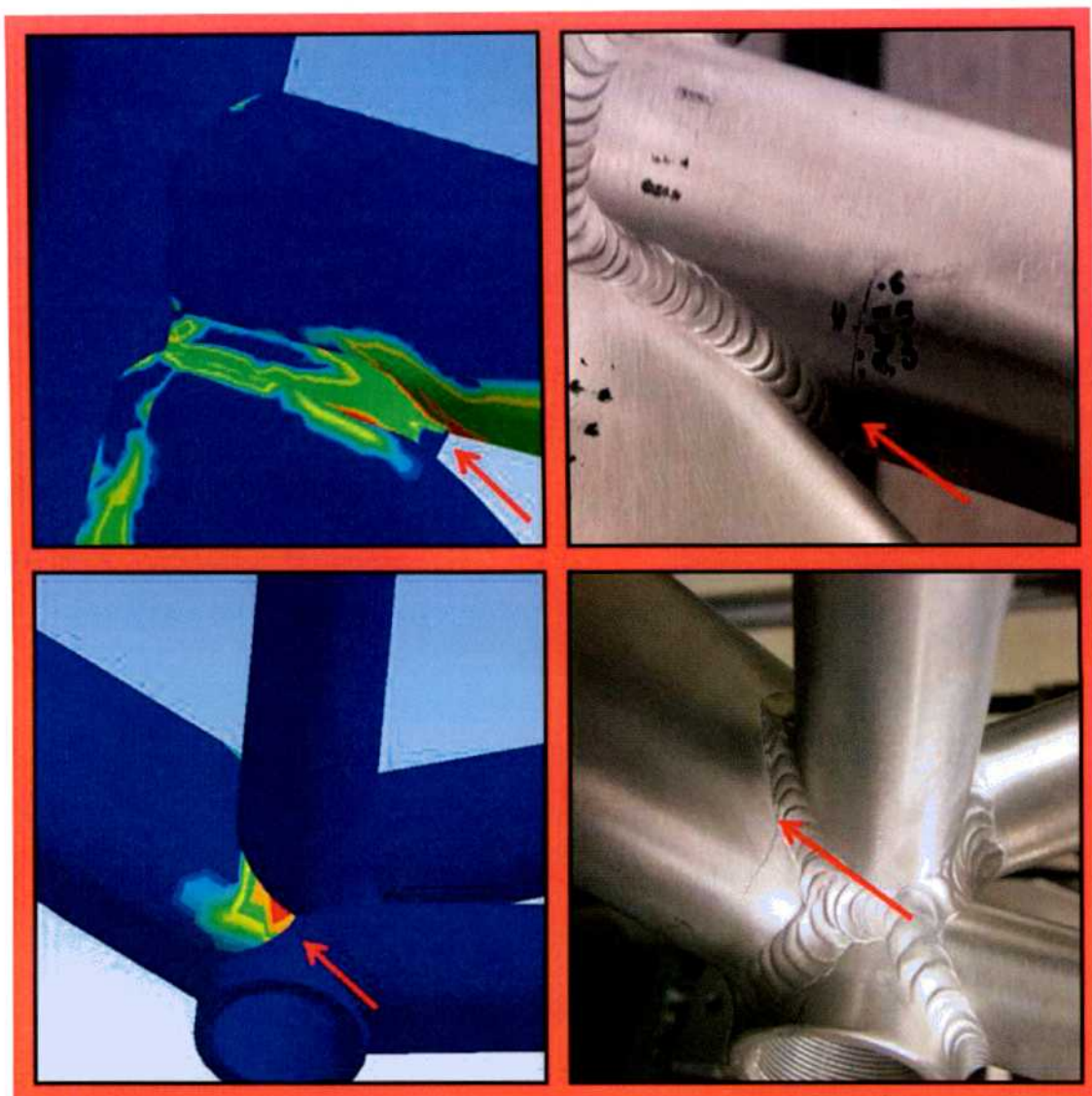


Figura A23. Simulación por elementos finitos y el modelo real ensayado por fatiga.

En conclusión, lo que se tendría que realizar con las muestras sería lo siguiente: un análisis químico para determinar la composición de cada uno de los tubos; una inspección visual de los tubos; un análisis microestructural del metal base y la zona del cordón de soldadura; medición de microdureza, análisis de las propiedades mecánicas y análisis con un microscopio electrónico de barrido (SEM) de la superficie de fractura. Luego de observar las distintas radiografías, se puede llegar a pensar que las posibles zonas con falta de fusión, como así también la falta de unión de los algunos de los tubos, puede haber llevado a un mal funcionamiento de todo el conjunto. Permitiendo de esta manera la propagación de fisuras en los lugares indicados.

Finalmente, algo que faltó indicar en los capítulos anteriores, es que distintos avances de este trabajo, fueron presentados en un Taller de Aluminio, llevado a cabo en La Plata y en un Congreso de Ensayos no Destructivos llevado a cabo en Campana.¹⁷

¹⁸ Quisiera dar las gracias al Laboratorio de Radiografía Industrial del ENDE, en especial a Mauricio Tacchia y Emilio Olivar (H).

6. Conclusiones

Como se detalló anteriormente, el objetivo del presente trabajo es proponer técnicas no destructivas para el estudio de cuadros de bicicleta de aleaciones de aluminio. Luego de la investigación realizada por el autor de este trabajo, se llega a las siguientes conclusiones.

La calidad de las señales indica que es posible inspeccionar cuadros de bicicleta en aleaciones de aluminio por el método no destructivo de corrientes inducidas.

Con ambos tipos de sensores, tanto bobina plana como bobina palpador, las señales obtenidas son similares.

El dispositivo diseñado es adaptable para la muestra seleccionada, tanto para la sonda plana como la sonda palpador. Sería interesante poder realizar un dispositivo más versátil, que pueda adaptarse a distintas muestras.

La inductancia medida en aire de la bobina palpador L_0 resultó bastante mayor que el valor de diseño. Esto indica que la fórmula aproximada que se utilizó para calcular N no es válida para esa relación alto/radio.

Se calculó L_0 utilizando otras expresiones aproximadas tomadas de la literatura, obteniéndose valores más ajustados a los medidos.

Si bien se utilizó una bobina con L_0 mayor que la de diseño, las señales obtenidas fueron aceptables. Esto fue así gracias a la tolerancia del sistema en cuanto a la impedancia de los sensores empleados.

La manera de calcular más exactamente N implicaría resolver la ecuación que corresponde a la inductancia L_0 a partir de un flujo magnético deseado para determinada geometría, lo cual no era el objetivo de este trabajo.

Luego de observar las distintas radiografías, se estima que las zonas donde se observa una posible falta de fusión, como así también la falta de unión en algunos de los tubos, puede haber llevado a un mal funcionamiento de todo el conjunto, permitiendo de esta manera la formación de fisuras en las zonas sometidas a mayores esfuerzos. Esto se podría corroborar mediante una simulación por elementos finitos.

Otra causa adicional, podría deberse a un problema de montaje. Es decir, el conjunto horquilla-stem no es ajustado con el torque suficiente o el torque de ajuste supera el recomendado, sobreajuste.

La norma exige la realización de ensayos de líquidos penetrantes para detectar defectos en el material. La idea de utilizar CI consiste en permitir detectar fisuras incipientes.

Para profundizar este estudio, se podría realizar algunos de los siguientes ensayos: análisis químico para determinar la composición de los tubos; inspección visual endoscópica de los tubos; análisis microestructural del metal base y la zona del cordón de soldadura; medición de microdureza; análisis de las propiedades mecánicas y análisis con un microscopio electrónico de barrido (SEM) de la superficie de fractura.

Cabe mencionar que cuando esta tesis estaba prácticamente concluida, se encontró una referencia de la aplicación de termografía activa a la inspección de cuadros de bicicleta de fibra de carbono.⁵¹

Apéndice

APENDICE 1

Caracterización con equipo Solartron de las bobinas indicadas en la sección 3.1.2.1.2. En cada medición (experimento), se midió en un rango de frecuencias de 60 a 600 Hz. Se trazó la recta $\text{Im}(Z)$ vs frecuencia y a partir de su pendiente se calculó la inductancia de cada bobina. Se hicieron dos experimentos por bobina.

- Bobina 01

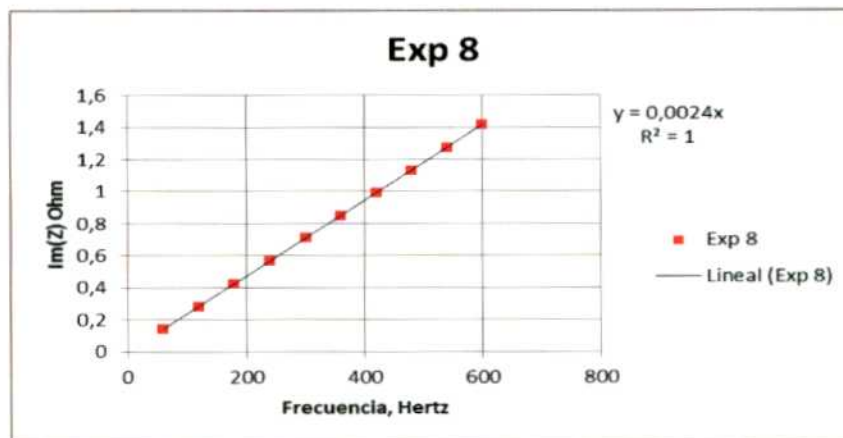
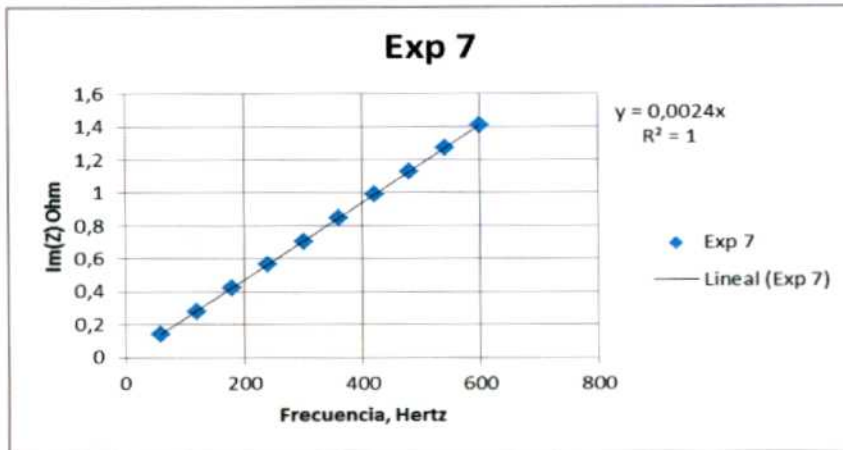
Exported SMaRT Impedance Data	exp. 7
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1\text{XE-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	0,52 $\pm$ 0,01	15,4 $\pm$ 0,3	0,140 $\pm$ 0,003
2	120	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	1,05 $\pm$ 0,01	15,4 $\pm$ 0,3	0,282 $\pm$ 0,006
3	180	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	1,58 $\pm$ 0,02	15,4 $\pm$ 0,3	0,424 $\pm$ 0,008
4	240	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	2,11 $\pm$ 0,02	15,4 $\pm$ 0,3	0,566 $\pm$ 0,011
5	300	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	2,63 $\pm$ 0,03	15,4 $\pm$ 0,3	0,706 $\pm$ 0,014
6	360	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	3,16 $\pm$ 0,03	15,4 $\pm$ 0,3	0,849 $\pm$ 0,017
7	420	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	3,68 $\pm$ 0,04	15,4 $\pm$ 0,3	0,989 $\pm$ 0,020
8	480	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	4,2 $\pm$ 0,04	15,4 $\pm$ 0,3	1,130 $\pm$ 0,023
9	540	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	4,72 $\pm$ 0,05	15,4 $\pm$ 0,3	1,270 $\pm$ 0,025
10	600	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	5,24 $\pm$ 0,05	15,4 $\pm$ 0,3	1,412 $\pm$ 0,028

Exported SMaRT Impedance Data	exp. 8
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1\text{XE-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	15,3 $\pm$ 0,2	0,52 $\pm$ 0,01	15,3 $\pm$ 0,3	0,140 $\pm$ 0,003
2	120	0,1	15,3 $\pm$ 0,2	1,05 $\pm$ 0,01	15,3 $\pm$ 0,3	0,282 $\pm$ 0,006
3	180	0,1	15,3 $\pm$ 0,2	1,58 $\pm$ 0,02	15,3 $\pm$ 0,3	0,423 $\pm$ 0,008
4	240	0,1	15,3 $\pm$ 0,2	2,11 $\pm$ 0,02	15,3 $\pm$ 0,3	0,566 $\pm$ 0,011
5	300	0,1	15,3 $\pm$ 0,2	2,64 $\pm$ 0,03	15,3 $\pm$ 0,3	0,707 $\pm$ 0,014
6	360	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	3,17 $\pm$ 0,03	15,3 $\pm$ 0,3	0,849 $\pm$ 0,017
7	420	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	3,69 $\pm$ 0,04	15,3 $\pm$ 0,3	0,988 $\pm$ 0,020
8	480	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	4,21 $\pm$ 0,04	15,3 $\pm$ 0,3	1,129 $\pm$ 0,023
9	540	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	4,74 $\pm$ 0,05	15,3 $\pm$ 0,3	1,271 $\pm$ 0,025
10	600	0,1	15,4 $\pm$ 0,2	5,27 $\pm$ 0,05	15,3 $\pm$ 0,3	1,413 $\pm$ 0,028

Para obtener la pendiente, de cada experimento, graficamos la parte imaginaria de Z en funcion de frecuencia.



Por lo tanto, calculamos la inductancia con la pendiente de las rectas, obtenidas en las figuras anteriores:

$$L_0 = \frac{m}{2\pi}$$

$$L_0 = \frac{0,0024}{2\pi}$$

$$L_0 = 375 \pm 1 \mu Hy$$

- Bobina 02

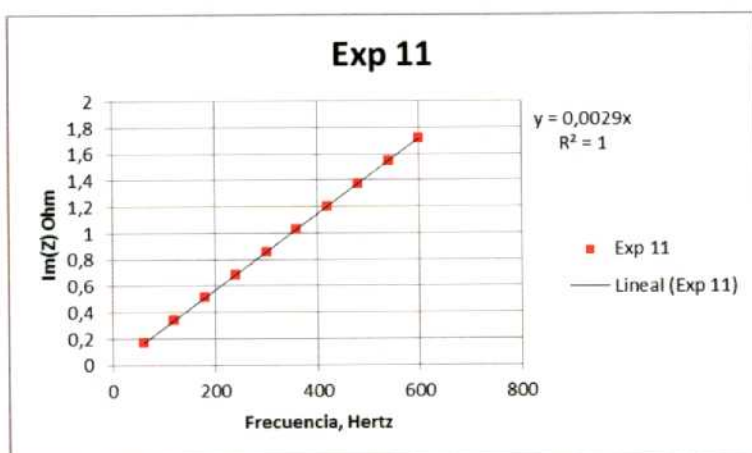
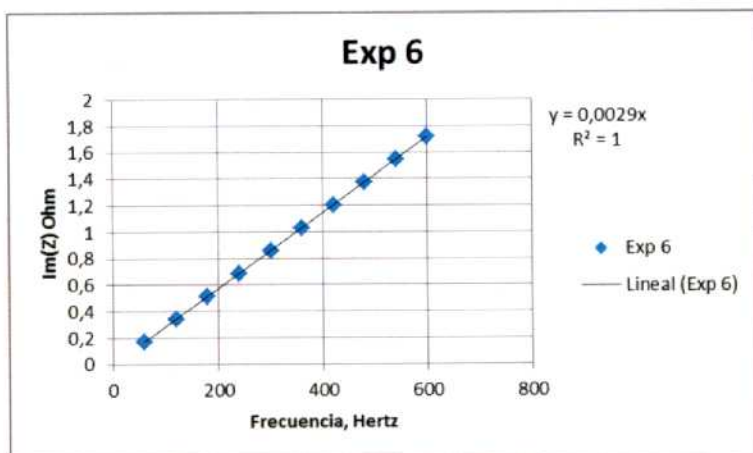
Exported SMaRT Impedance Data	exp. 6
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1 \times 10^{-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	0,57 $\pm$ 0,01	17,1 $\pm$ 0,3	0,171 $\pm$ 0,003
2	120	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	1,15 $\pm$ 0,01	17,1 $\pm$ 0,3	0,343 $\pm$ 0,007
3	180	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	1,73 $\pm$ 0,02	17,1 $\pm$ 0,3	0,516 $\pm$ 0,010
4	240	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	2,3 $\pm$ 0,02	17,1 $\pm$ 0,3	0,688 $\pm$ 0,014
5	300	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	2,88 $\pm$ 0,03	17,1 $\pm$ 0,3	0,860 $\pm$ 0,017
6	360	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	3,44 $\pm$ 0,03	17,1 $\pm$ 0,3	1,029 $\pm$ 0,021
7	420	0,1	17,1 $\pm$ 0,2	4,02 $\pm$ 0,04	17,1 $\pm$ 0,3	1,202 $\pm$ 0,024
8	480	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	4,59 $\pm$ 0,05	17,1 $\pm$ 0,3	1,373 $\pm$ 0,027
9	540	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	5,16 $\pm$ 0,05	17,1 $\pm$ 0,3	1,545 $\pm$ 0,031
10	600	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	5,73 $\pm$ 0,06	17,1 $\pm$ 0,3	1,717 $\pm$ 0,034

Exported SMaRT Impedance Data	exp. 11
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1 \times 10^{-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	0,57 $\pm$ 0,01	17,2 $\pm$ 0,3	0,171 $\pm$ 0,003
2	120	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	1,14 $\pm$ 0,01	17,2 $\pm$ 0,3	0,344 $\pm$ 0,007
3	180	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	1,72 $\pm$ 0,02	17,2 $\pm$ 0,3	0,516 $\pm$ 0,010
4	240	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	2,29 $\pm$ 0,02	17,2 $\pm$ 0,3	0,688 $\pm$ 0,014
5	300	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	2,85 $\pm$ 0,03	17,2 $\pm$ 0,3	0,858 $\pm$ 0,017
6	360	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	3,42 $\pm$ 0,03	17,2 $\pm$ 0,3	1,030 $\pm$ 0,021
7	420	0,1	17,2 $\pm$ 0,2	4 $\pm$ 0,04	17,2 $\pm$ 0,3	1,202 $\pm$ 0,024
8	480	0,1	17,3 $\pm$ 0,2	4,57 $\pm$ 0,05	17,2 $\pm$ 0,3	1,376 $\pm$ 0,028
9	540	0,1	17,3 $\pm$ 0,2	5,14 $\pm$ 0,05	17,2 $\pm$ 0,3	1,547 $\pm$ 0,031
10	600	0,1	17,3 $\pm$ 0,2	5,7 $\pm$ 0,06	17,2 $\pm$ 0,3	1,718 $\pm$ 0,034

Para obtener la pendiente, de cada experimento, graficamos la parte imaginaria de Z en funcion de frecuencia.



Por lo tanto, calculamos la inductancia con la pendiente de las rectas, obtenidas en las figuras anteriores:

$$L_0 = \frac{m}{2\pi}$$

$$L_0 = \frac{0,0029}{2\pi}$$

$$L_0 = 461 \pm 1 \mu Hy$$

- Bobina 03

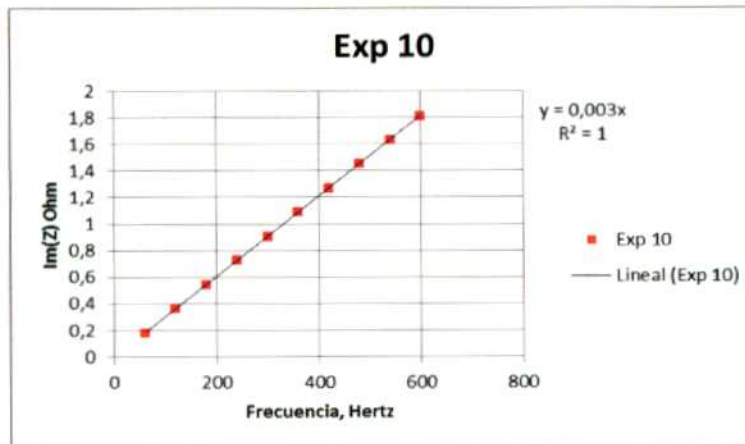
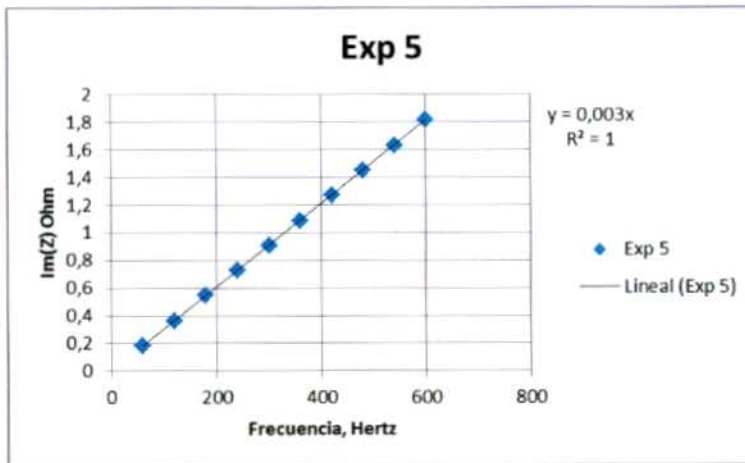
Exported SMaRT Impedance Data	exp. 5
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1 \times 10^{-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	17,5 $\pm$ 0,2	0,59 $\pm$ 0,01	17,5 $\pm$ 0,4	0,181 $\pm$ 0,004
2	120	0,1	17,5 $\pm$ 0,2	1,18 $\pm$ 0,01	17,5 $\pm$ 0,4	0,036 $\pm$ 0,007
3	180	0,1	17,5 $\pm$ 0,2	1,78 $\pm$ 0,02	17,5 $\pm$ 0,4	0,544 $\pm$ 0,011
4	240	0,1	17,5 $\pm$ 0,2	2,37 $\pm$ 0,02	17,5 $\pm$ 0,4	0,726 $\pm$ 0,015
5	300	0,1	17,5 $\pm$ 0,2	2,96 $\pm$ 0,03	17,5 $\pm$ 0,4	0,905 $\pm$ 0,018
6	360	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	3,55 $\pm$ 0,04	17,5 $\pm$ 0,4	1,087 $\pm$ 0,022
7	420	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	4,14 $\pm$ 0,04	17,5 $\pm$ 0,4	1,268 $\pm$ 0,025
8	480	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	4,73 $\pm$ 0,05	17,5 $\pm$ 0,4	1,449 $\pm$ 0,029
9	540	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	5,32 $\pm$ 0,05	17,5 $\pm$ 0,4	1,631 $\pm$ 0,033
10	600	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	5,91 $\pm$ 0,06	17,5 $\pm$ 0,4	1,813 $\pm$ 0,036

Exported SMaRT Impedance Data	exp. 10
Experiment start time : 15/11/2011	

	f $\pm 1 \times 10^{-5}$ [Hz]	V ± 0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	0,59 $\pm$ 0,01	17,6 $\pm$ 0,4	0,181 $\pm$ 0,004
2	120	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	1,18 $\pm$ 0,01	17,6 $\pm$ 0,4	0,362 $\pm$ 0,007
3	180	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	1,77 $\pm$ 0,02	17,6 $\pm$ 0,4	0,544 $\pm$ 0,011
4	240	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	2,37 $\pm$ 0,02	17,6 $\pm$ 0,4	0,725 $\pm$ 0,015
5	300	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	2,96 $\pm$ 0,03	17,6 $\pm$ 0,4	0,907 $\pm$ 0,018
6	360	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	3,55 $\pm$ 0,04	17,6 $\pm$ 0,4	1,088 $\pm$ 0,021
7	420	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	4,13 $\pm$ 0,04	17,6 $\pm$ 0,4	1,269 $\pm$ 0,025
8	480	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	4,73 $\pm$ 0,05	17,6 $\pm$ 0,4	1,452 $\pm$ 0,029
9	540	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	5,31 $\pm$ 0,05	17,6 $\pm$ 0,4	1,632 $\pm$ 0,033
10	600	0,1	17,6 $\pm$ 0,2	5,89 $\pm$ 0,06	17,6 $\pm$ 0,4	1,812 $\pm$ 0,036

Para obtener la pendiente, de cada experimento, graficamos la parte imaginaria de Z en funcion de frecuencia.



Y calculamos la inductancia a partir de la pendiente de las rectas, obtenidas en las figuras anteriores:

$$L_0 = \frac{m}{2\pi}$$

$$L_0 = \frac{0,003}{2\pi}$$

$$L_0 = (477 \pm 1) \mu\text{Hy}$$

- Bobina 04

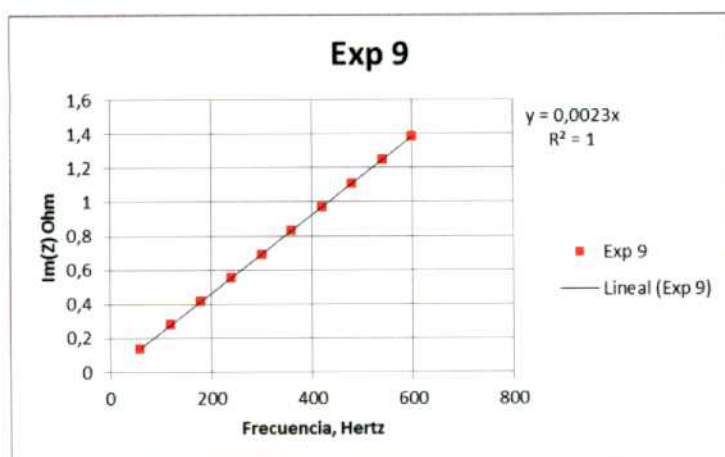
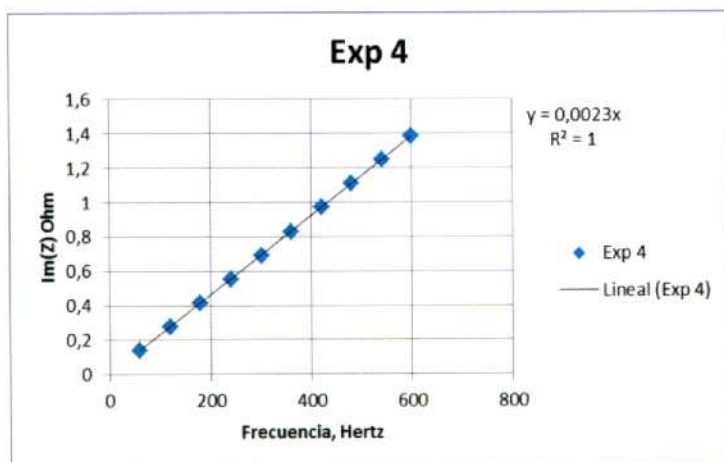
Exported SMaRT Impedance Data	exp. 4
Experiment start time : 15/11/2011	

	f ±1XE- 5 [Hz]	V ±0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	16,2 ± 0,2	0,49 ± 0,00	16,2 ± 0,3	0,138 ± 0,003
2	120	0,1	16,2 ± 0,2	0,98 ± 0,01	16,2 ± 0,3	0,277 ± 0,006
3	180	0,1	16,2 ± 0,2	1,47 ± 0,01	16,2 ± 0,3	0,416 ± 0,008
4	240	0,1	16,2 ± 0,2	1,97 ± 0,02	16,2 ± 0,3	0,554 ± 0,011
5	300	0,1	16,2 ± 0,2	2,45 ± 0,02	16,2 ± 0,3	0,691 ± 0,014
6	360	0,1	16,2 ± 0,2	2,94 ± 0,03	16,1 ± 0,3	0,830 ± 0,017
7	420	0,1	16,2 ± 0,2	3,44 ± 0,03	16,1 ± 0,3	0,969 ± 0,019
8	480	0,1	16,2 ± 0,2	3,92 ± 0,04	16,1 ± 0,3	1,106 ± 0,022
9	540	0,1	16,2 ± 0,2	4,41 ± 0,04	16,1 ± 0,3	1,246 ± 0,025
10	600	0,1	16,2 ± 0,2	4,9 ± 0,05	16,1 ± 0,3	1,383 ± 0,028

Exported SMaRT Impedance Data	exp. 9
Experiment start time : 15/11/2011	

	f ±1XE- 5 [Hz]	V ±0.01 [Volt]	Mod (Z) [Ohm] (E=0.1%)	Fi (Grados) (E=0,1%)	Re (Z) [Ohm] (E=0,2%)	Im (Z) [Ohm] (E=0,2%)
1	60	0,1	16,2 ± 0,2	0,49 ± 0,00	16,2 ± 0,3	0,137 ± 0,003
2	120	0,1	16,2 ± 0,2	0,98 ± 0,01	16,2 ± 0,3	0,277 ± 0,006
3	180	0,1	16,2 ± 0,2	1,47 ± 0,01	16,2 ± 0,3	0,415 ± 0,008
4	240	0,1	16,2 ± 0,2	1,96 ± 0,02	16,2 ± 0,3	0,554 ± 0,011
5	300	0,1	16,2 ± 0,2	2,45 ± 0,02	16,2 ± 0,3	0,692 ± 0,014
6	360	0,1	16,2 ± 0,2	2,93 ± 0,03	16,2 ± 0,3	0,829 ± 0,017
7	420	0,1	16,2 ± 0,2	3,42 ± 0,03	16,2 ± 0,3	0,967 ± 0,019
8	480	0,1	16,2 ± 0,2	3,91 ± 0,04	16,2 ± 0,3	1,107 ± 0,022
9	540	0,1	16,2 ± 0,2	4,4 ± 0,04	16,2 ± 0,3	1,246 ± 0,025
10	600	0,1	16,2 ± 0,2	4,89 ± 0,05	16,2 ± 0,3	1,384 ± 0,028

Para obtener la pendiente, de cada experimento, graficamos la parte imaginaria de Z en funcion de frecuencia.



Por lo tanto, calculamos la inductancia con la pendiente de las rectas, obtenidas en las figuras anteriores:

$$L_0 = \frac{m}{2\pi}$$

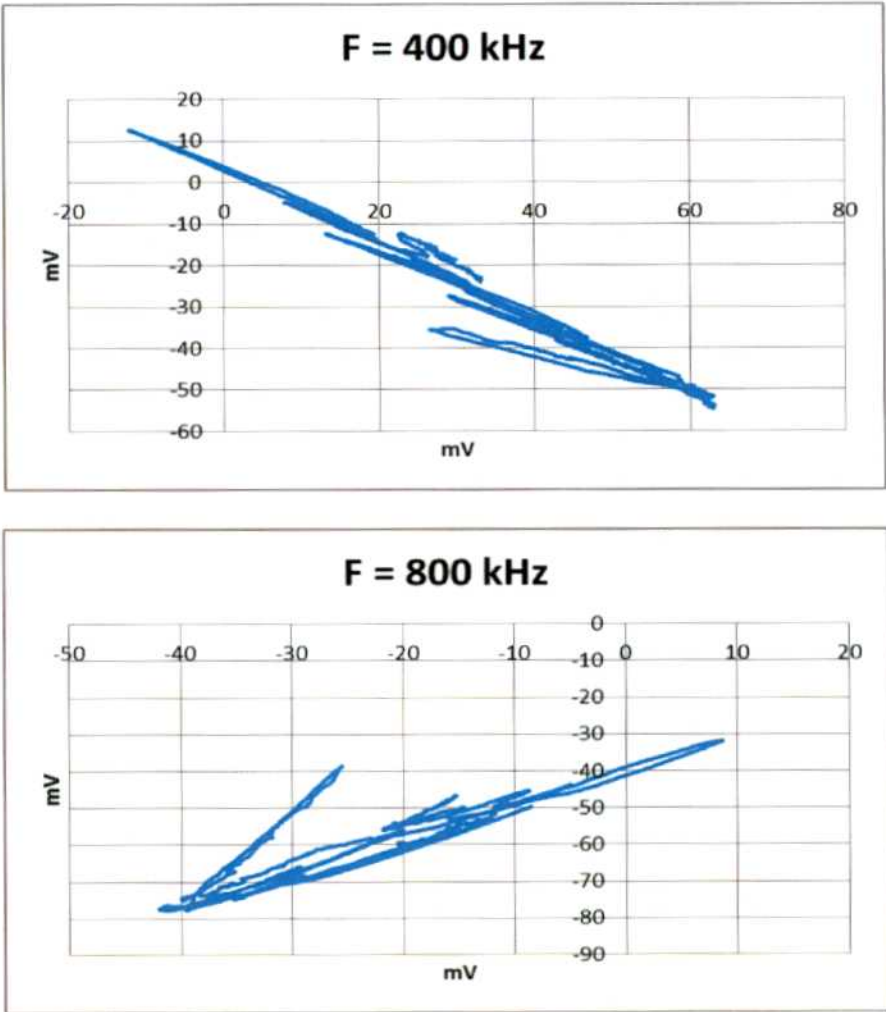
$$L_0 = \frac{0,0023}{2\pi}$$

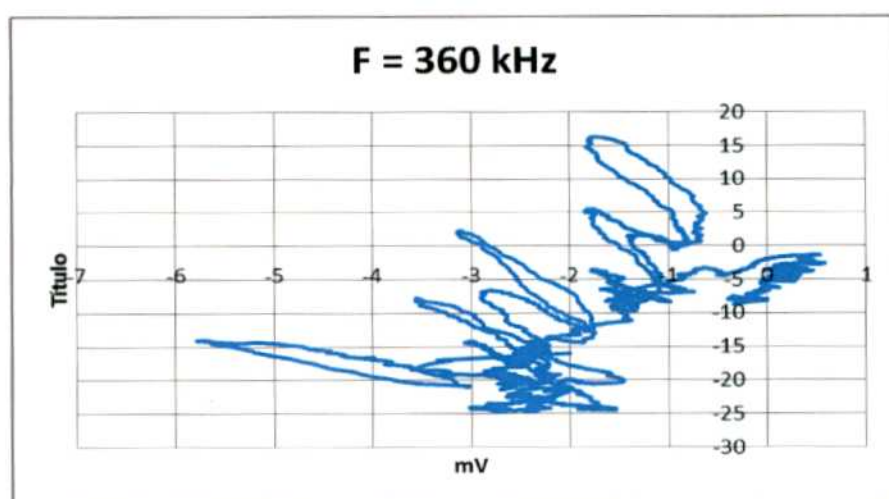
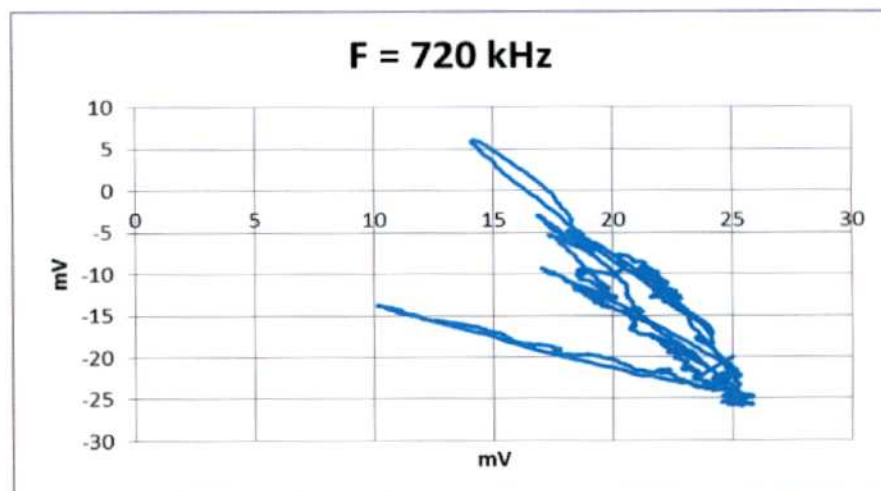
$$L_0 = (366 \pm 1) \mu Hy$$

APENDICE 2

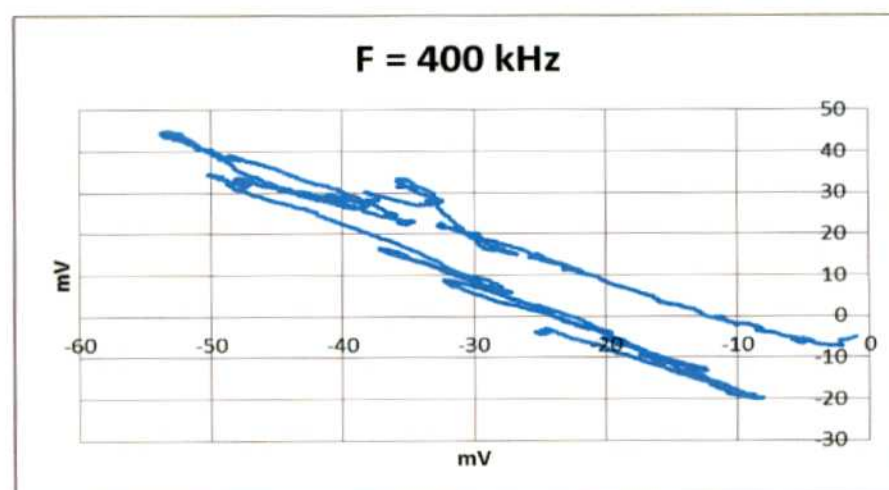
Grafico de las mediciones seleccionadas. Ref. Tabla 4.5

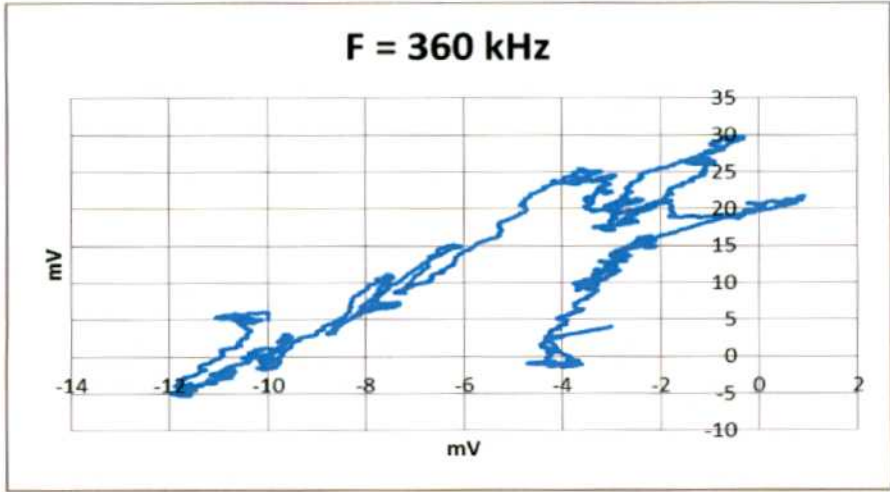
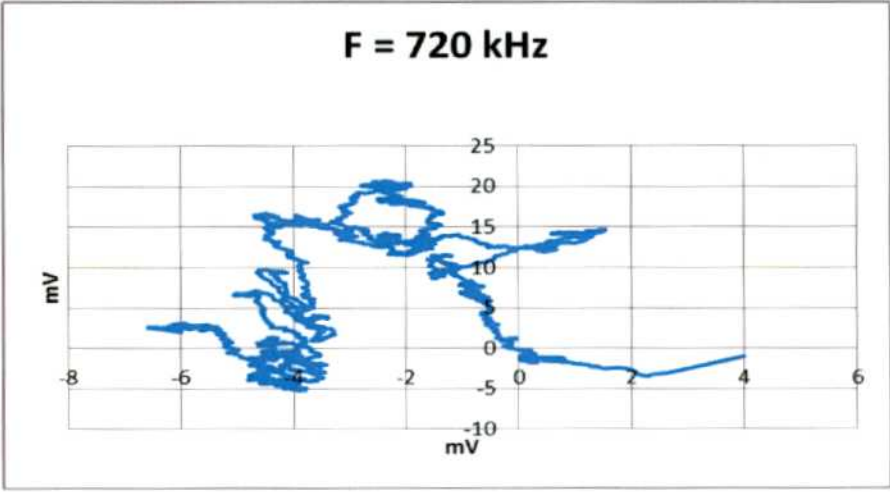
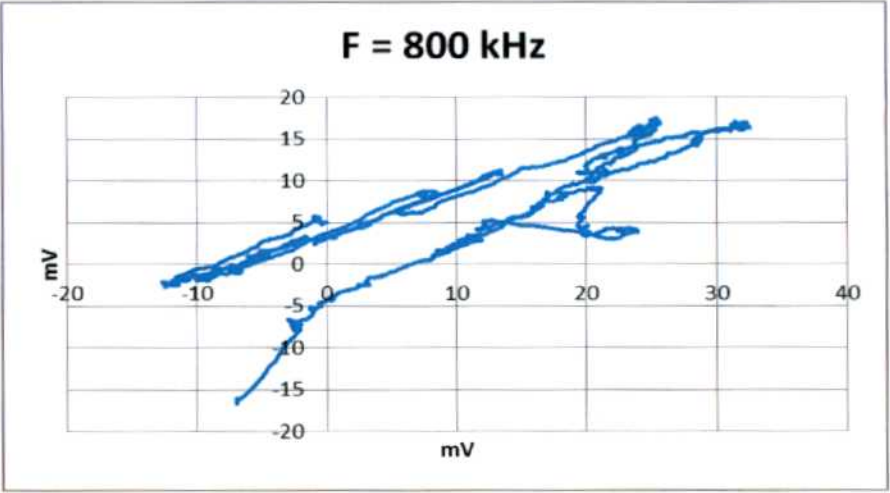
- Medición 1



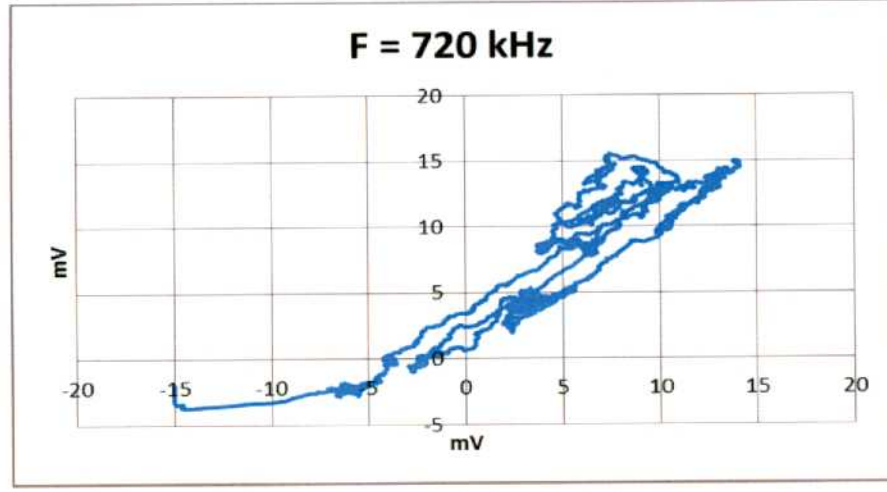
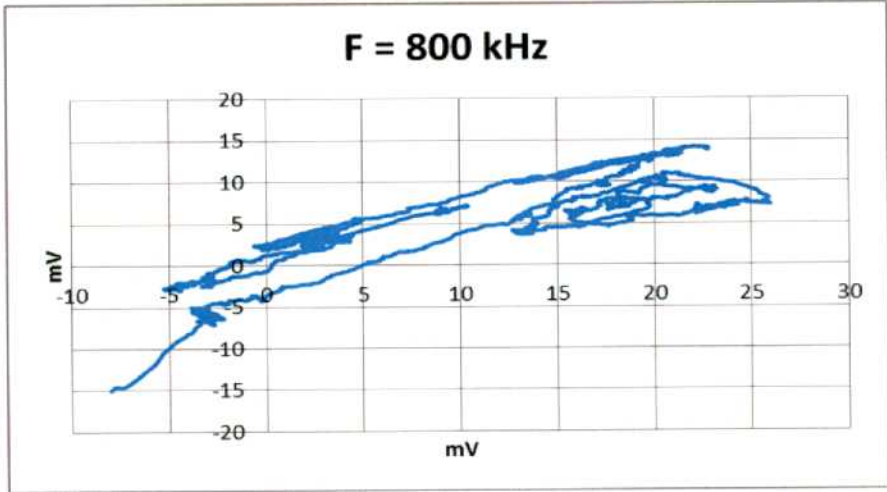
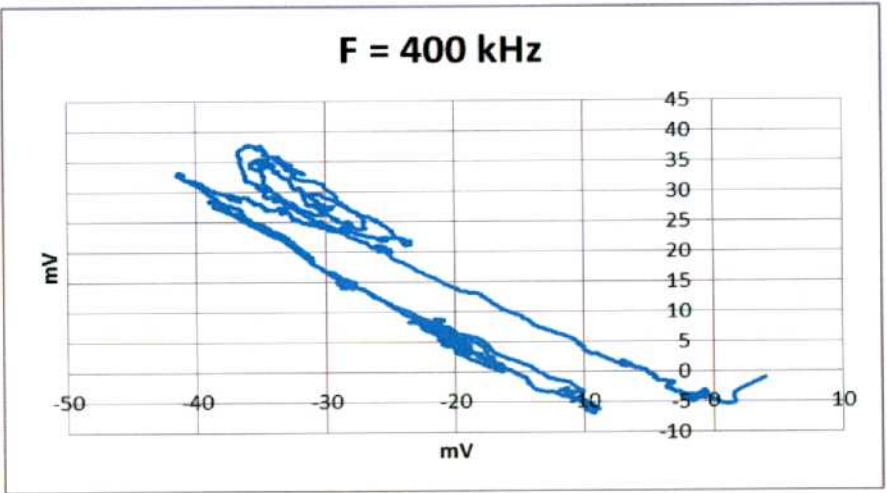


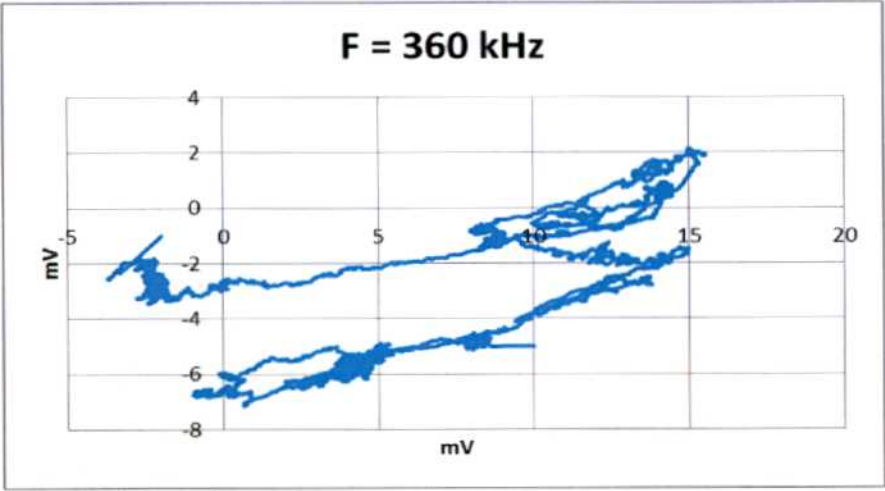
- Medición 2



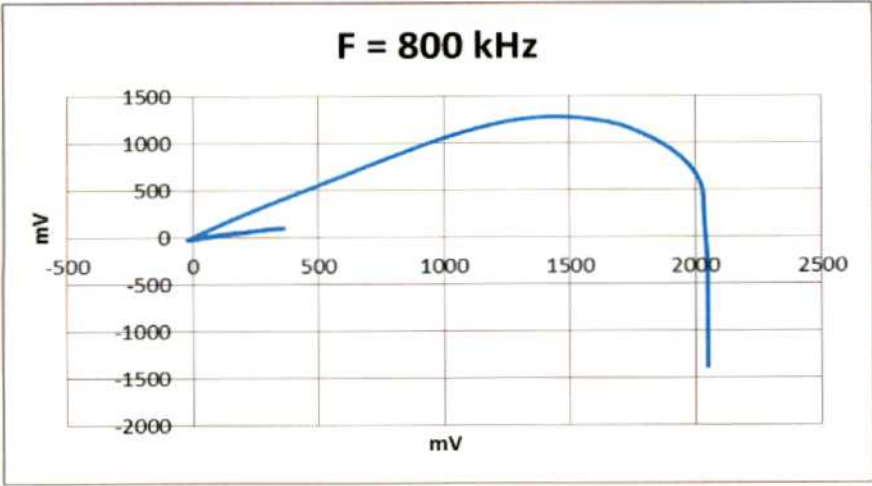
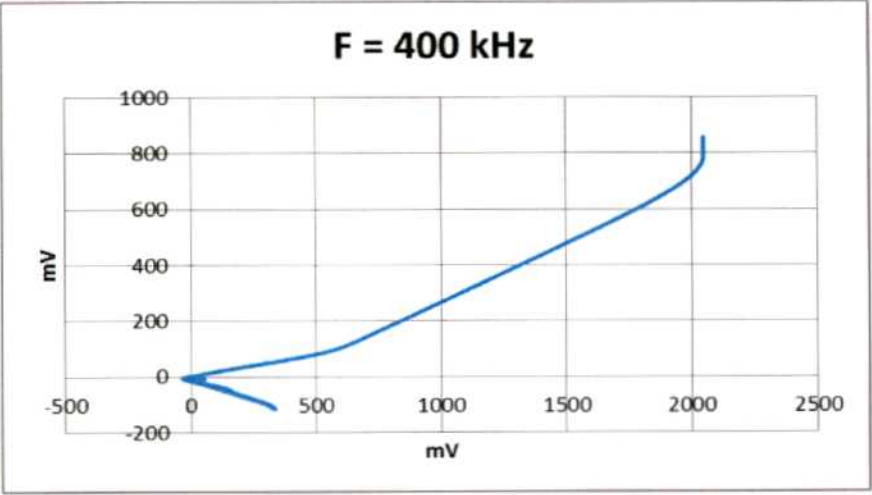


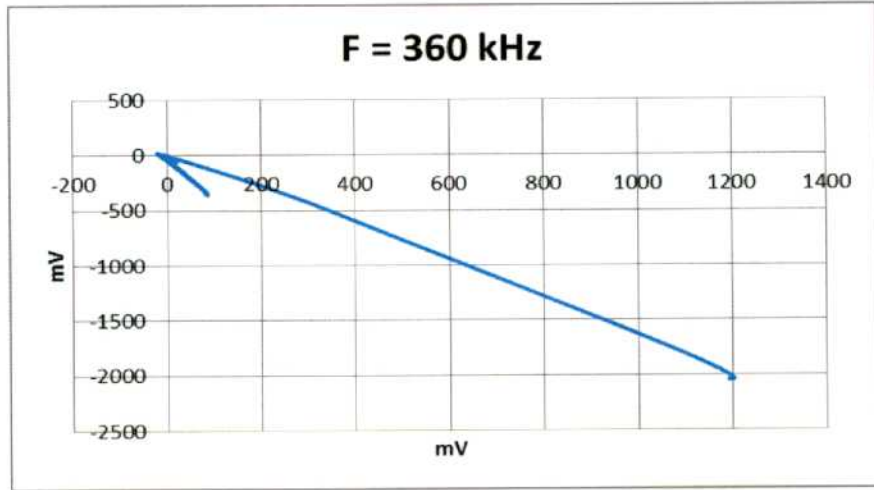
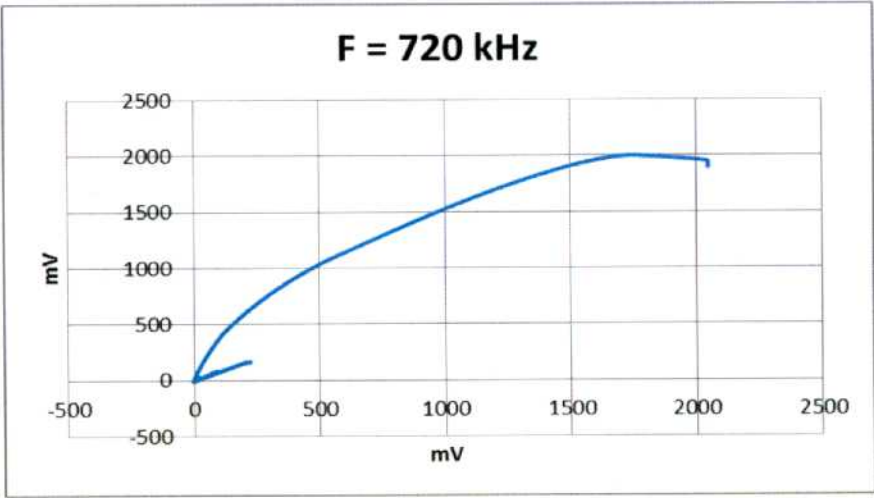
- Medición 3



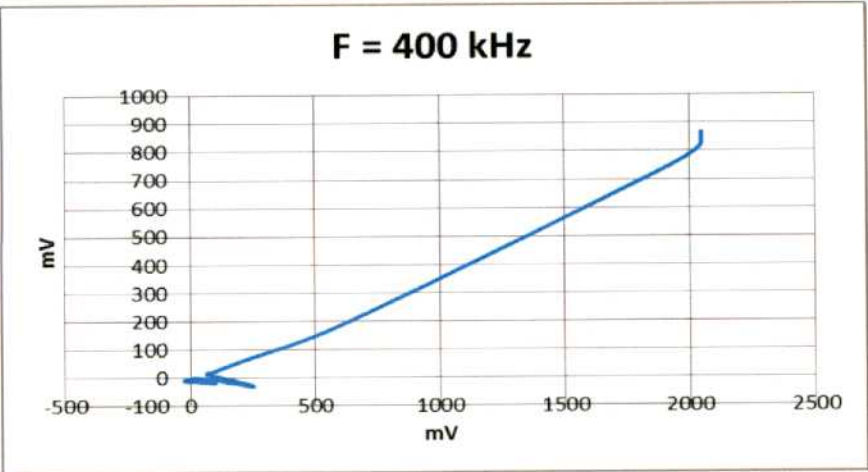


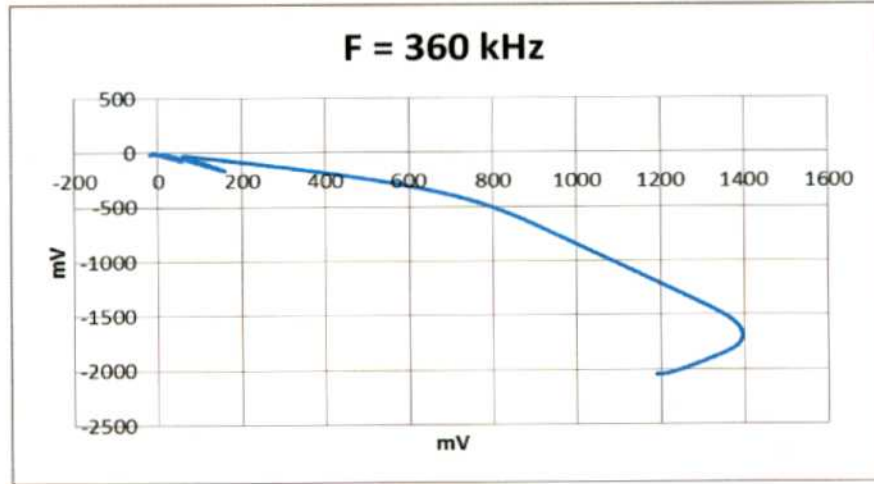
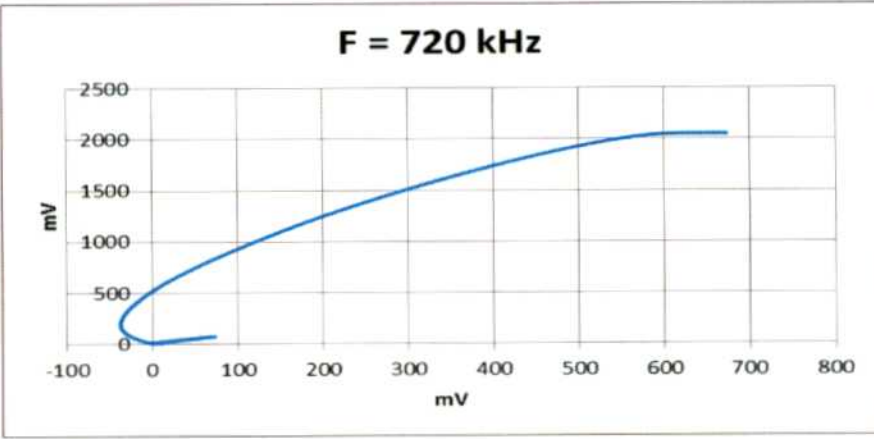
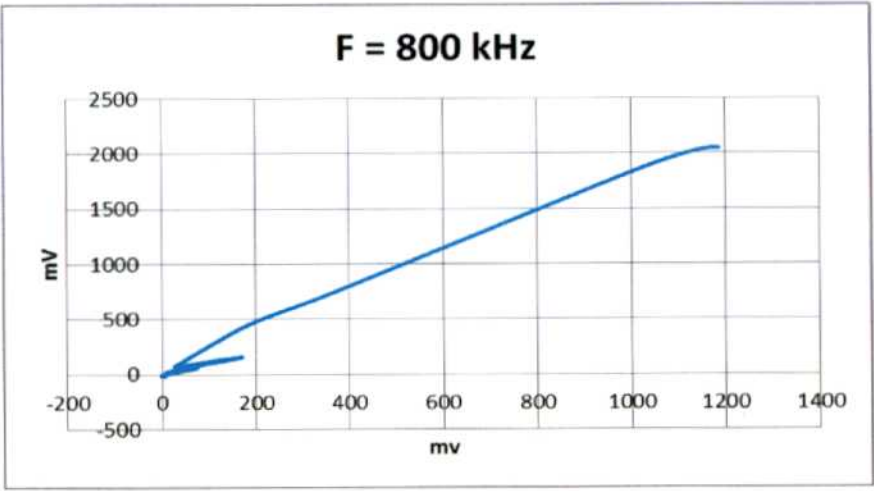
- Medición 4



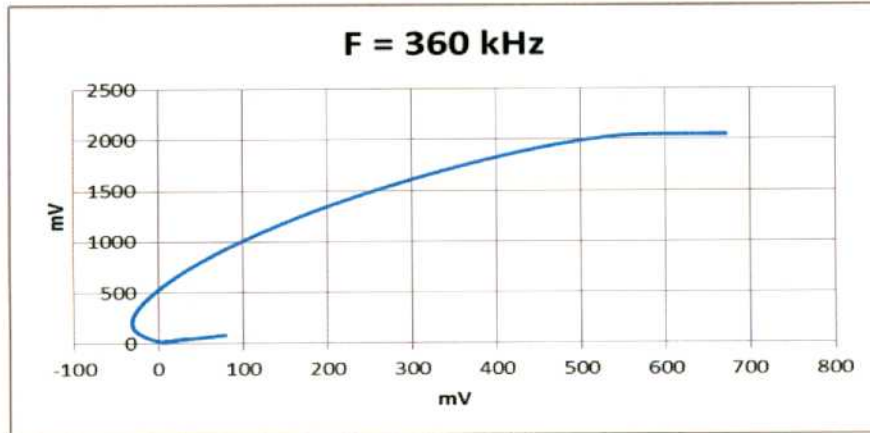
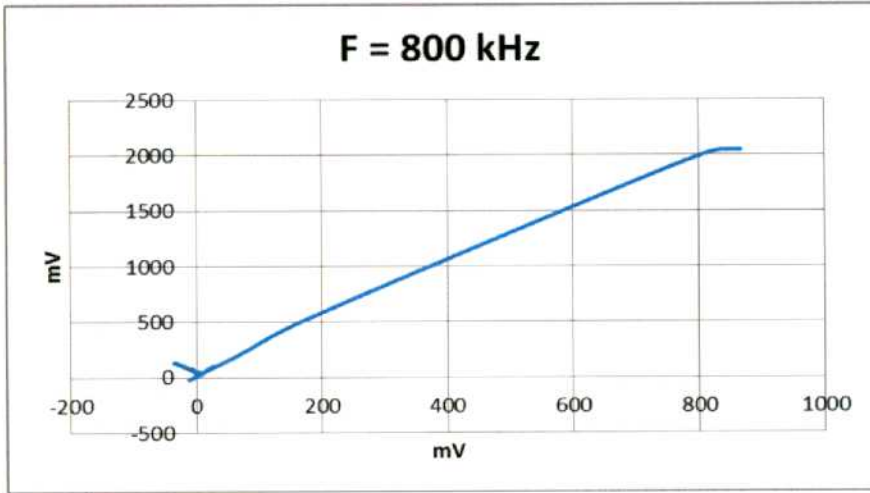
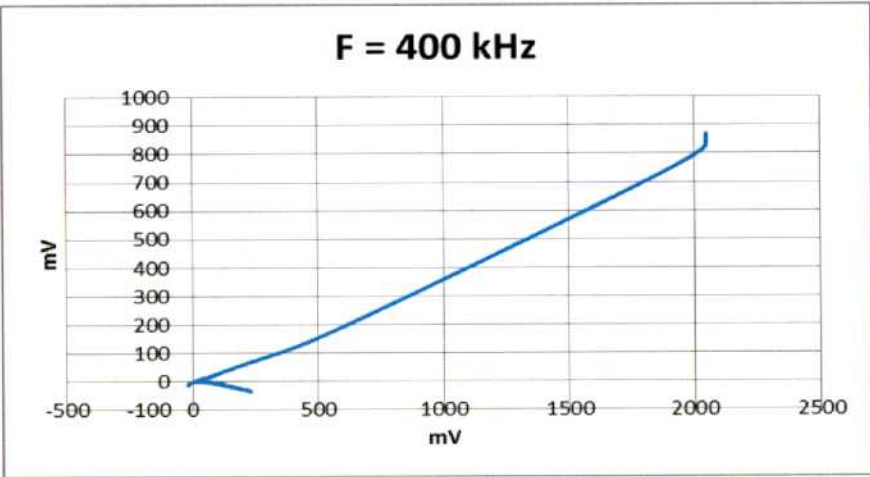


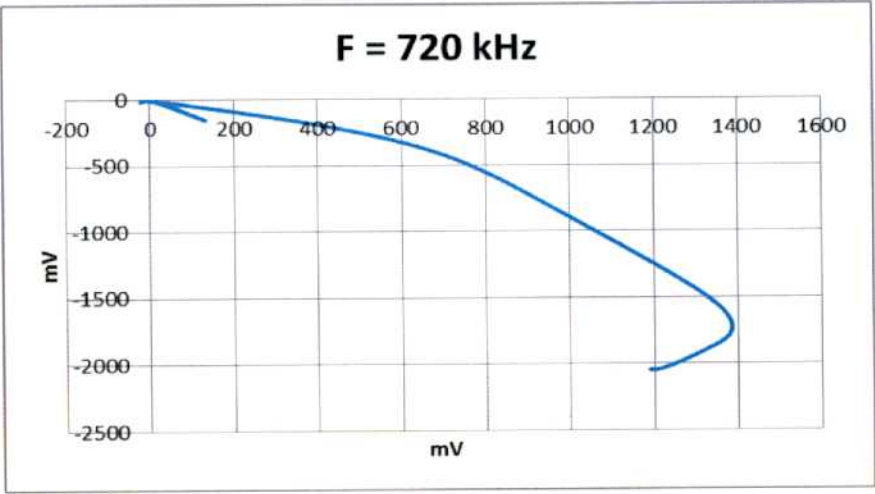
- Medición 5



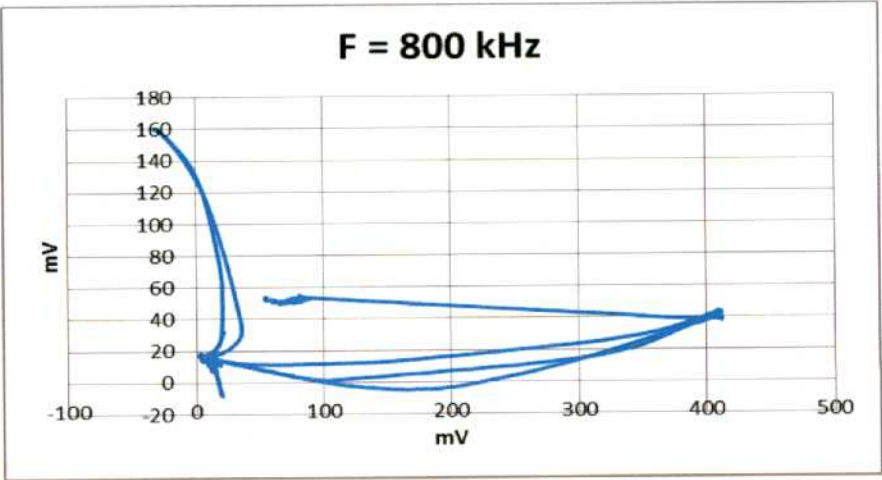
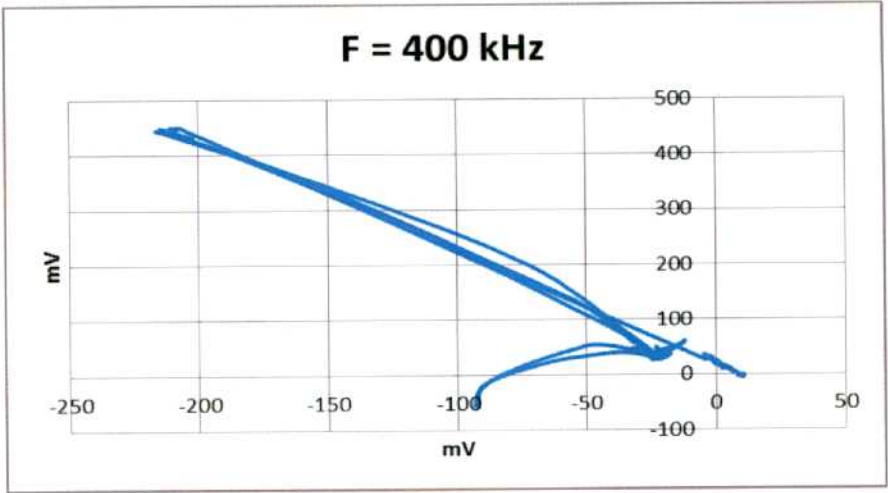


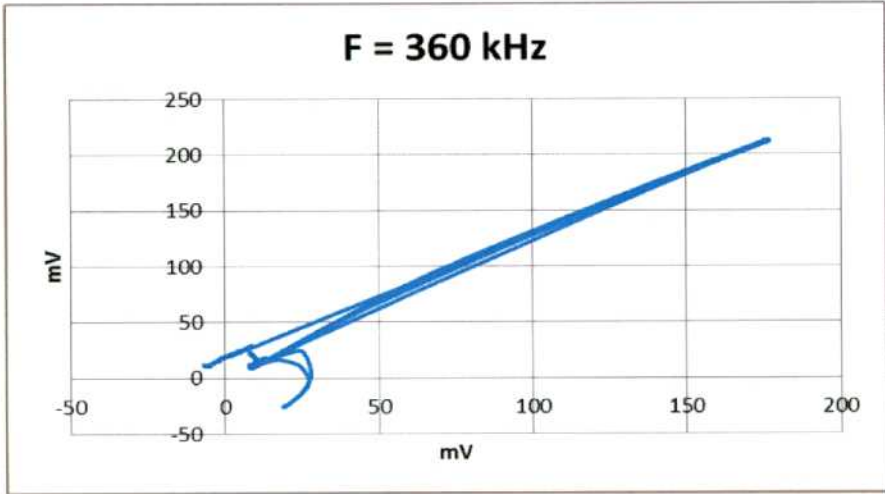
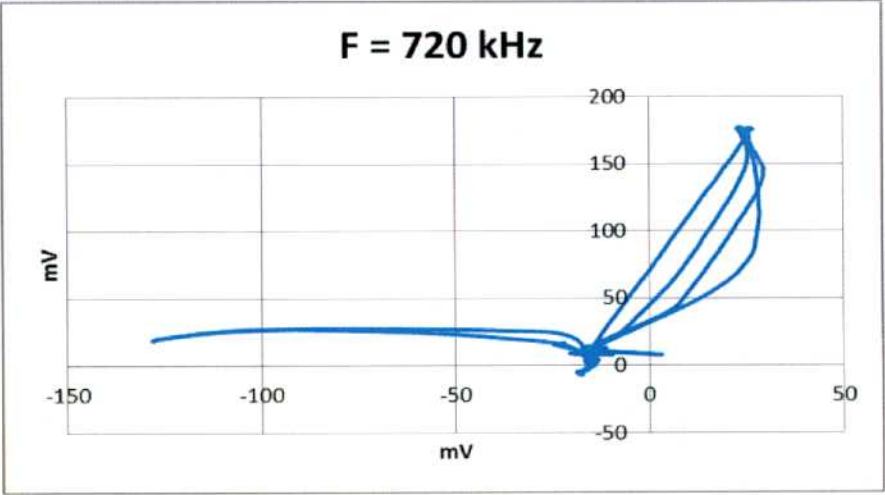
- Medición 6



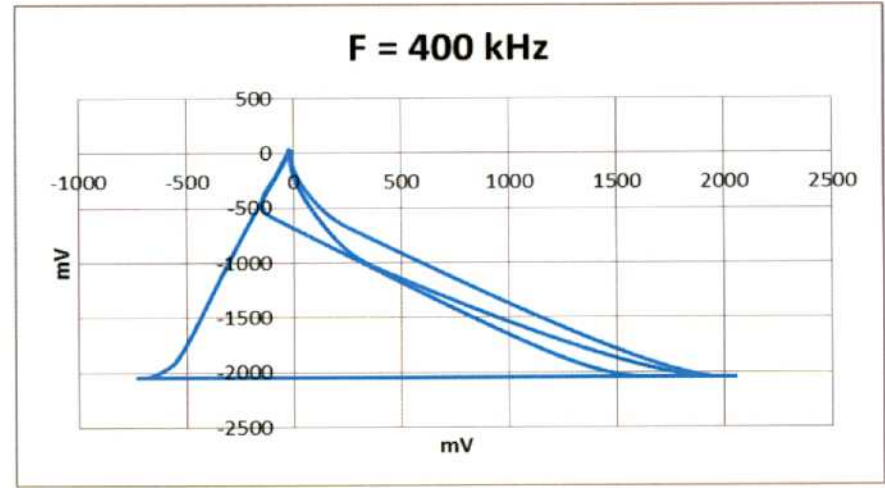


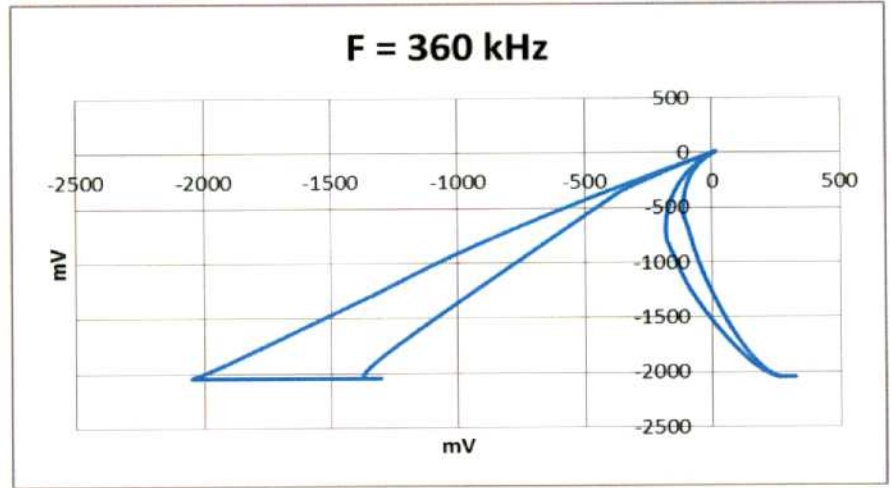
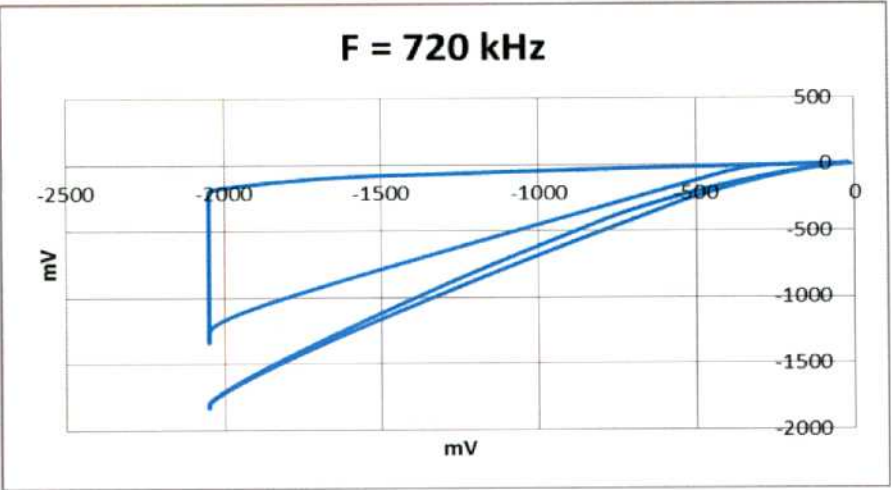
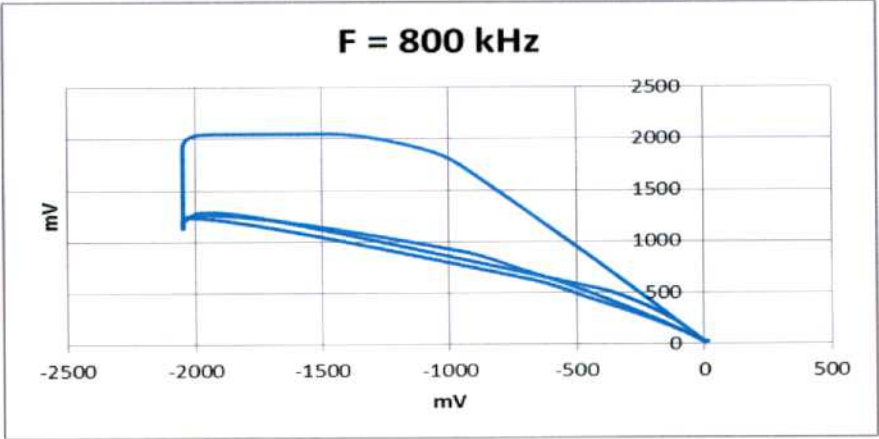
- Medición 7



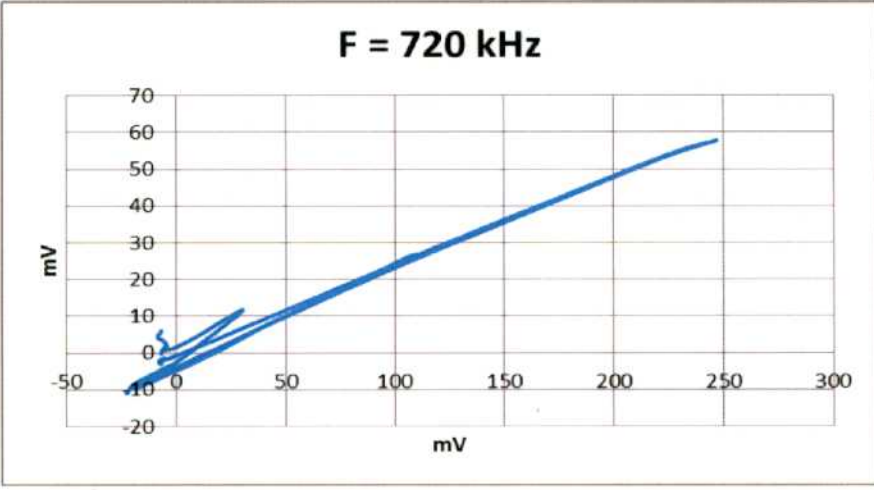
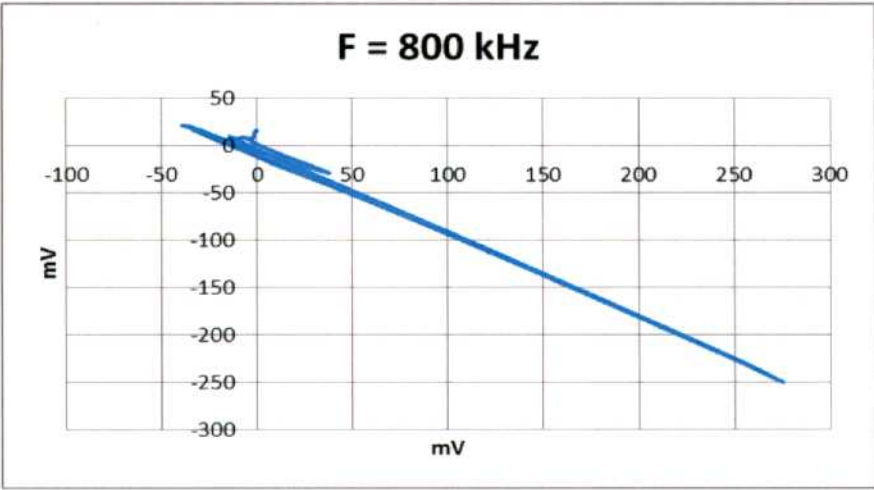
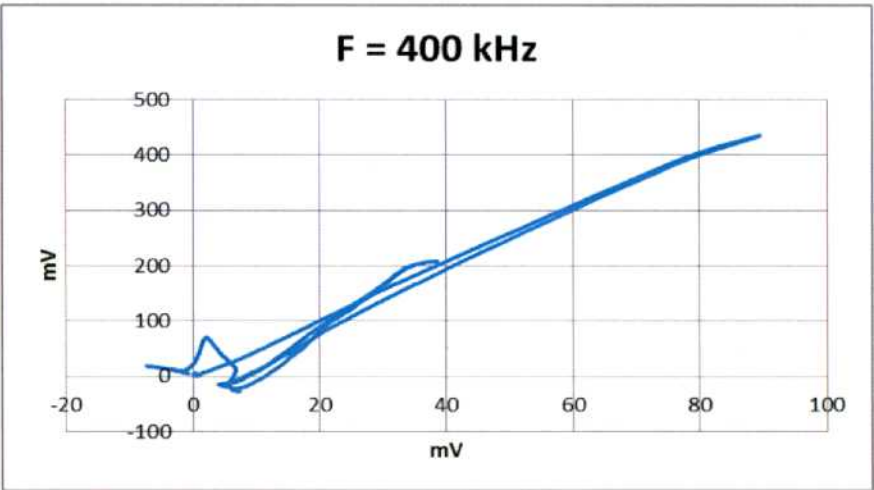


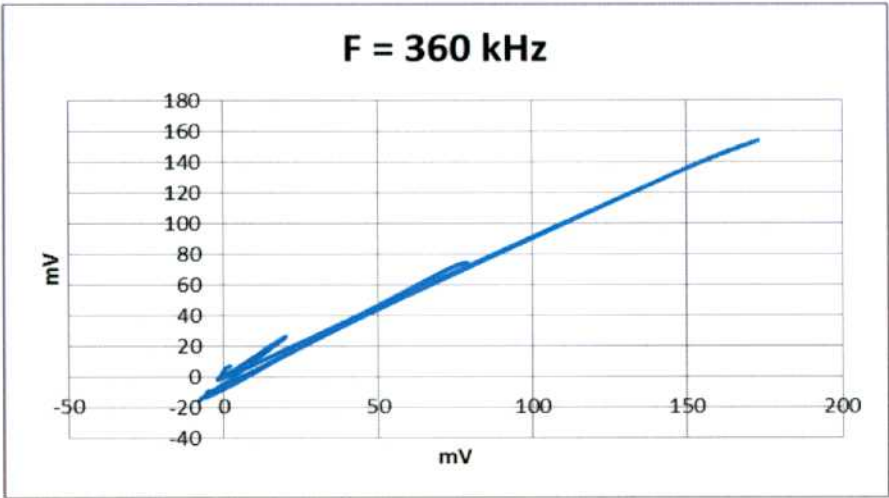
- Medición 8



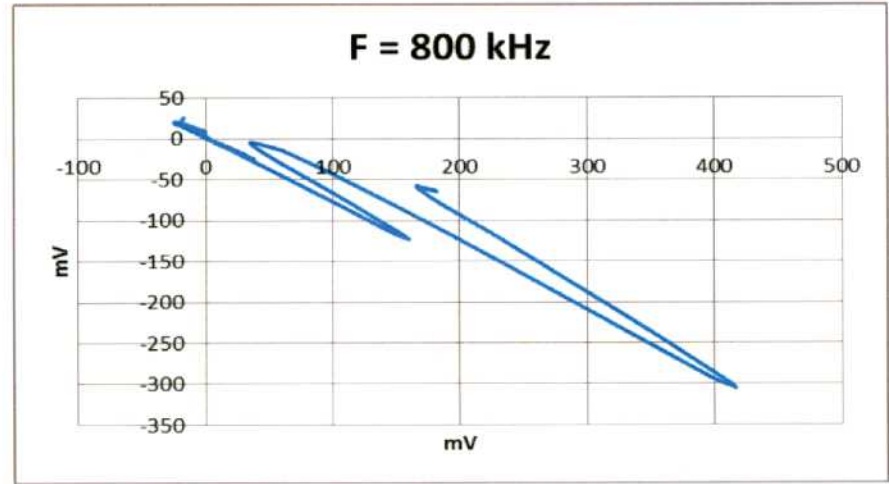
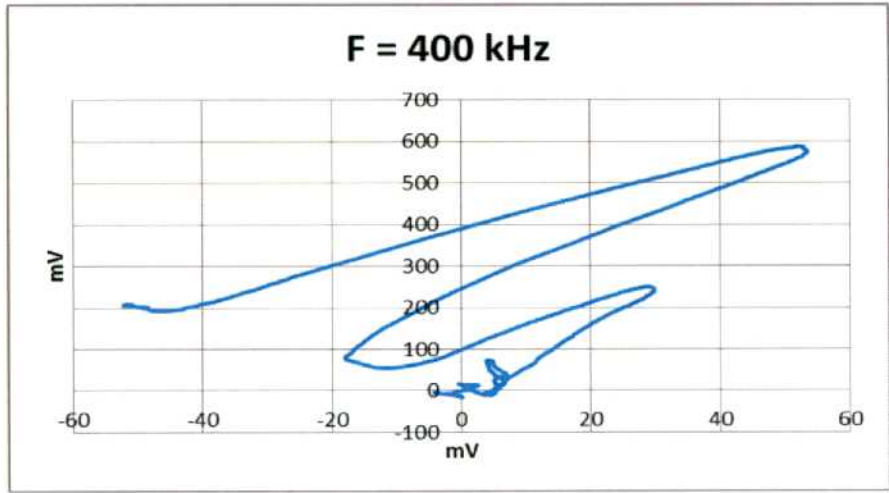


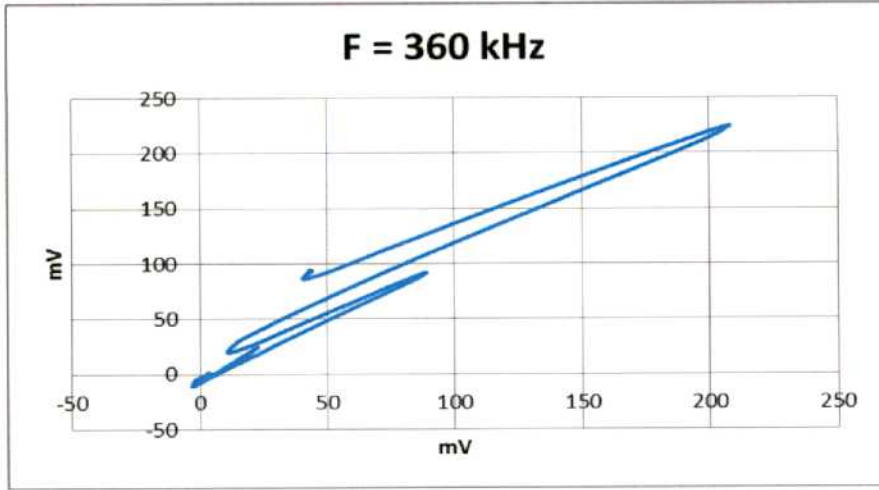
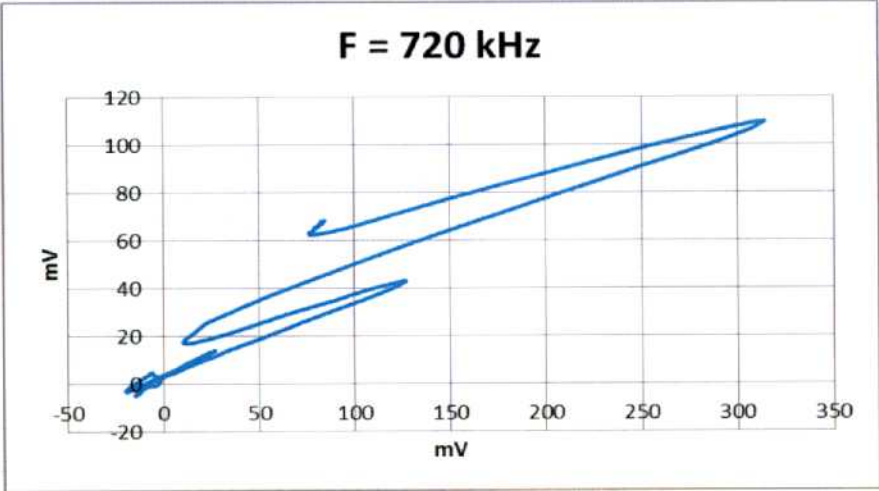
- Medición 9



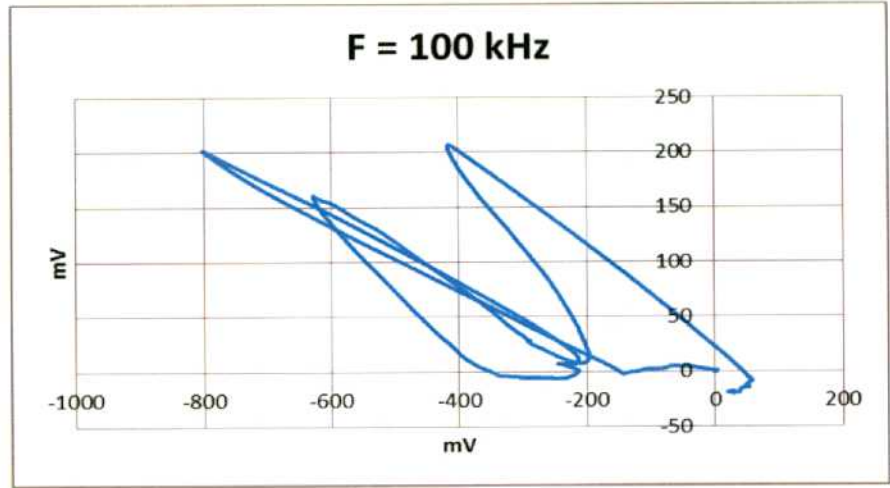


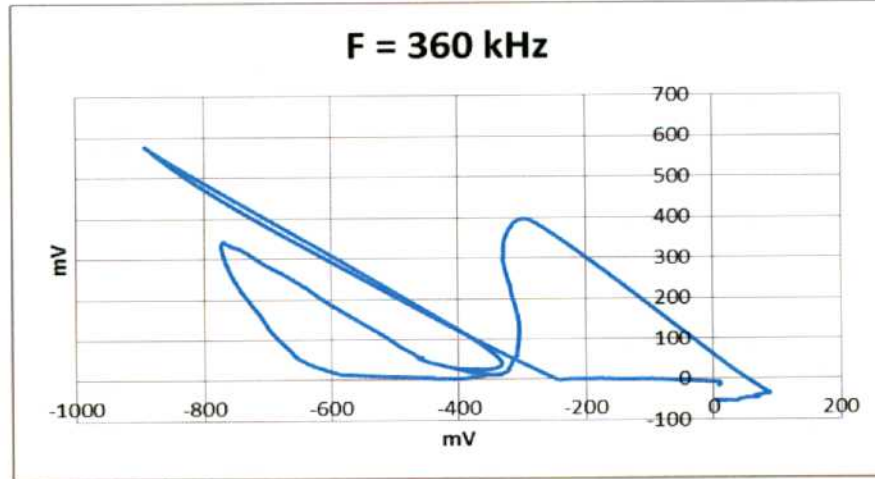
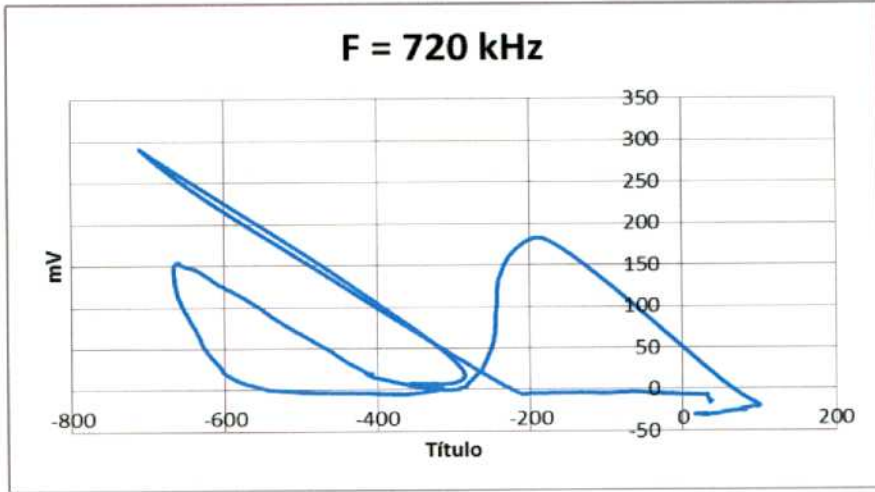
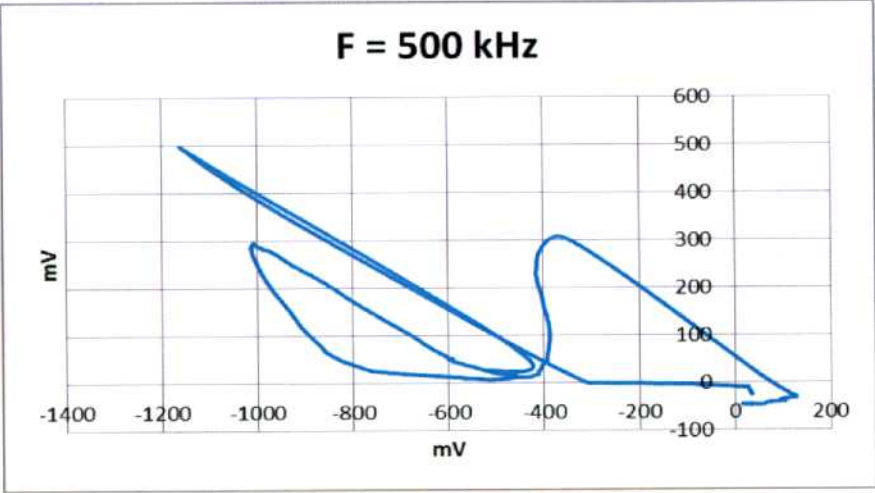
- Medición 10



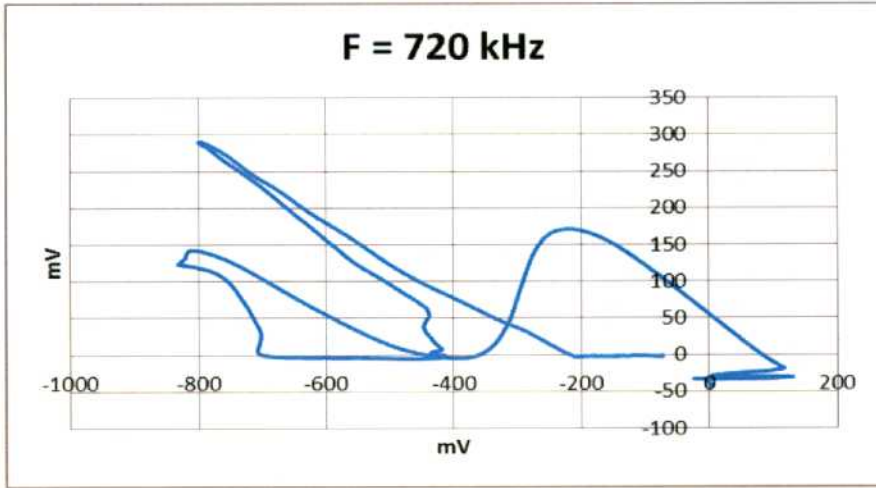
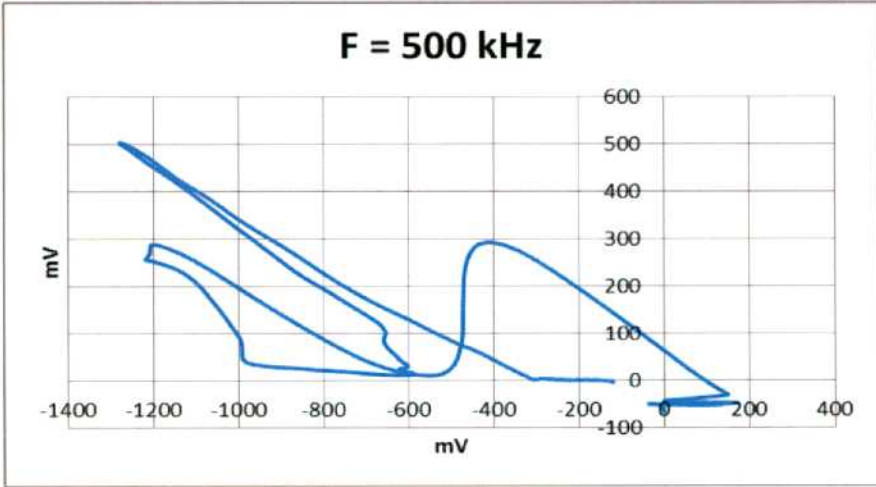
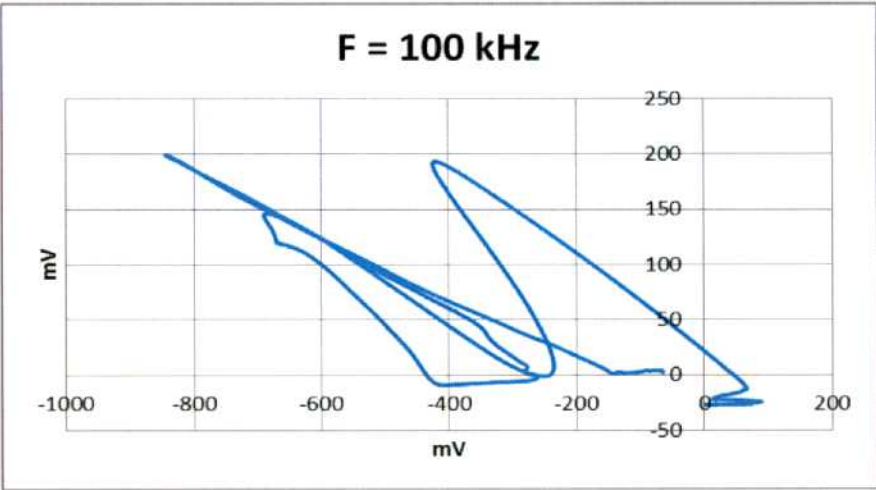


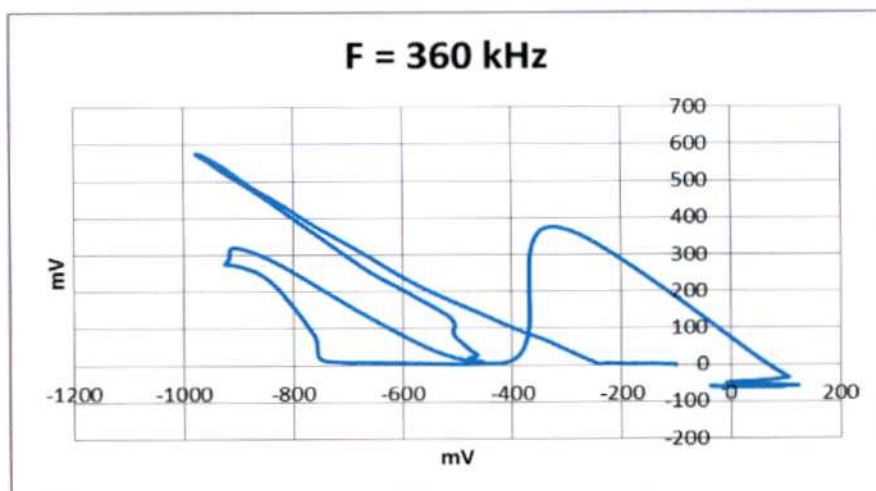
- Medición 11



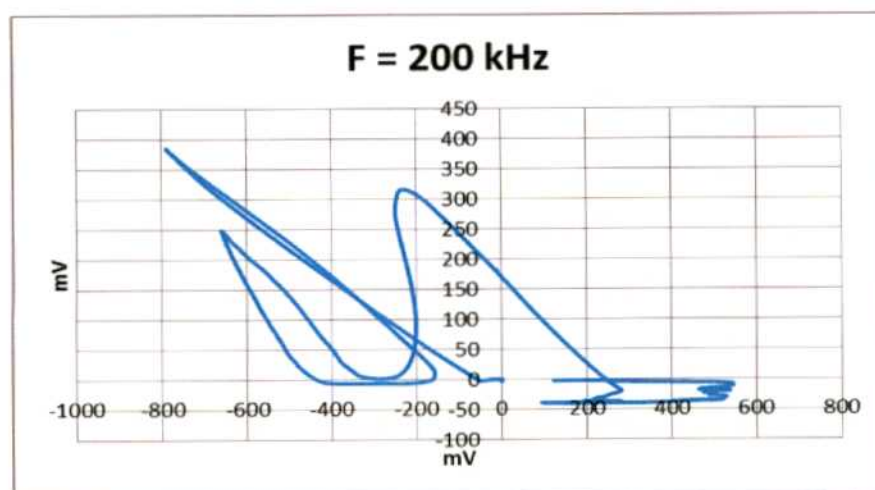
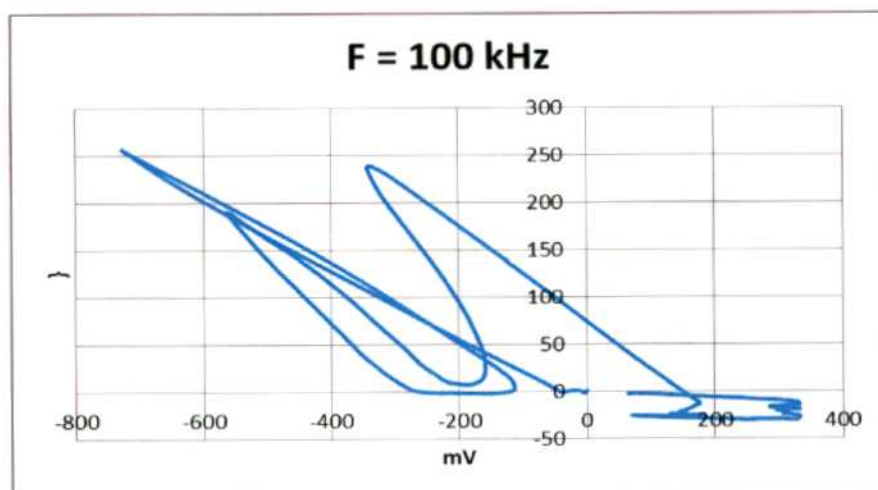


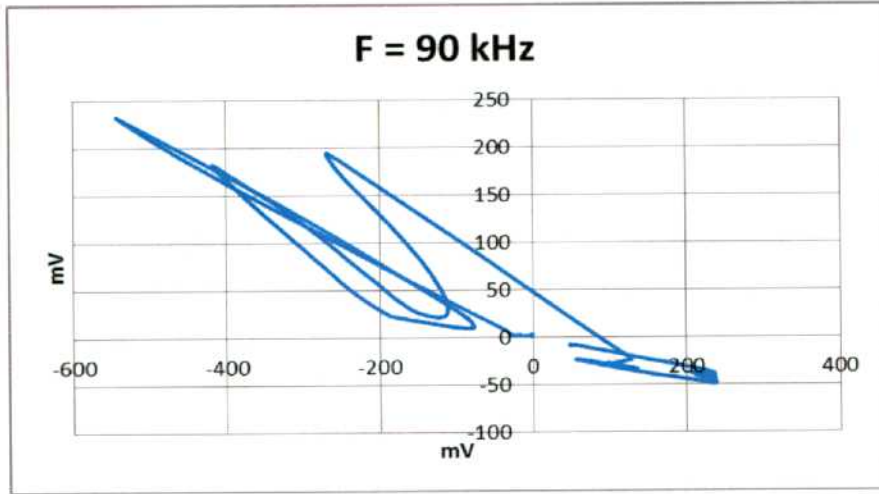
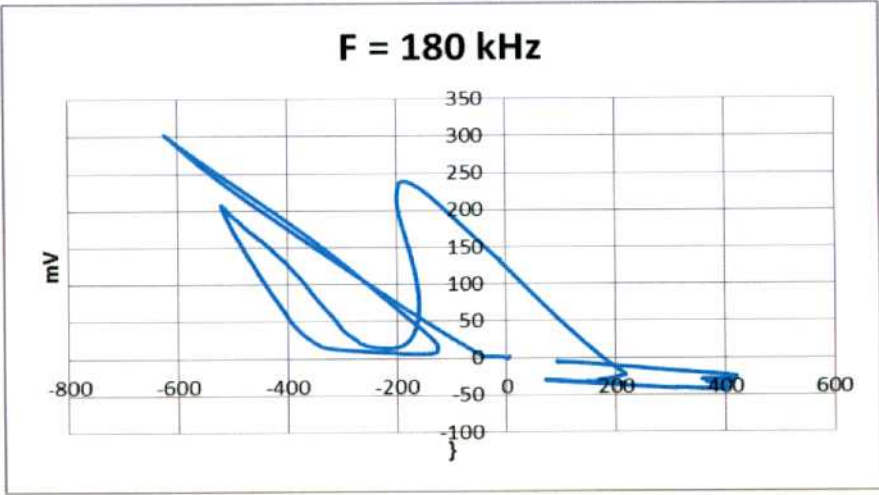
- Medición 12



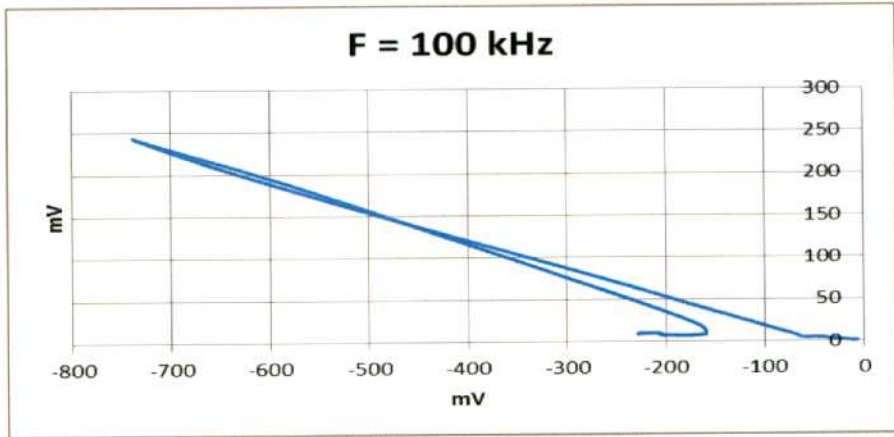


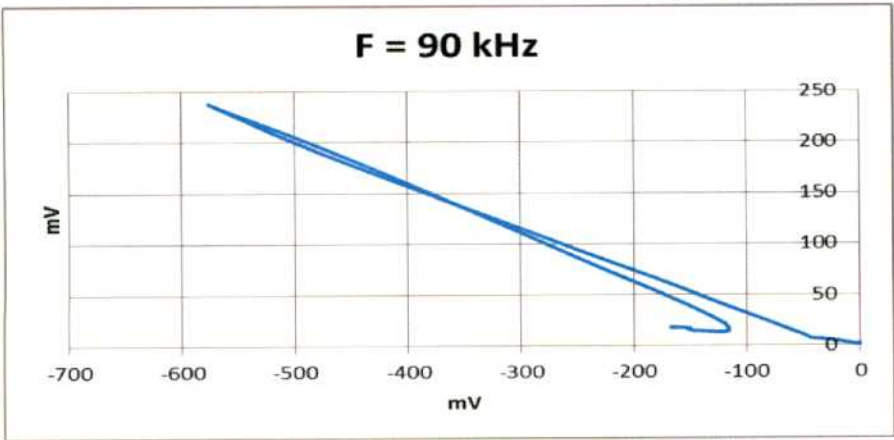
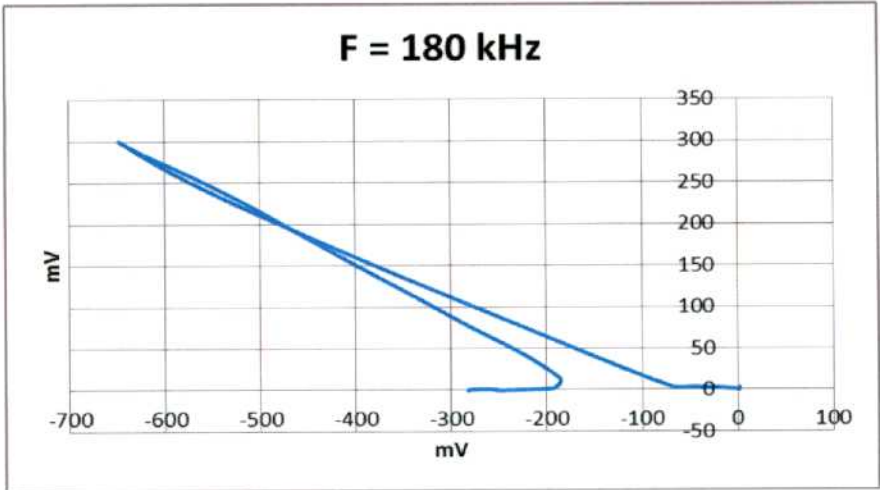
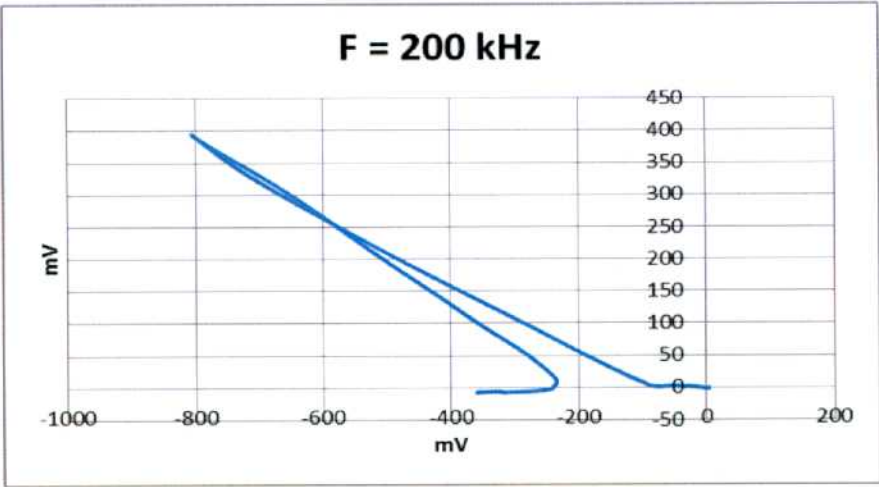
- Medición 13



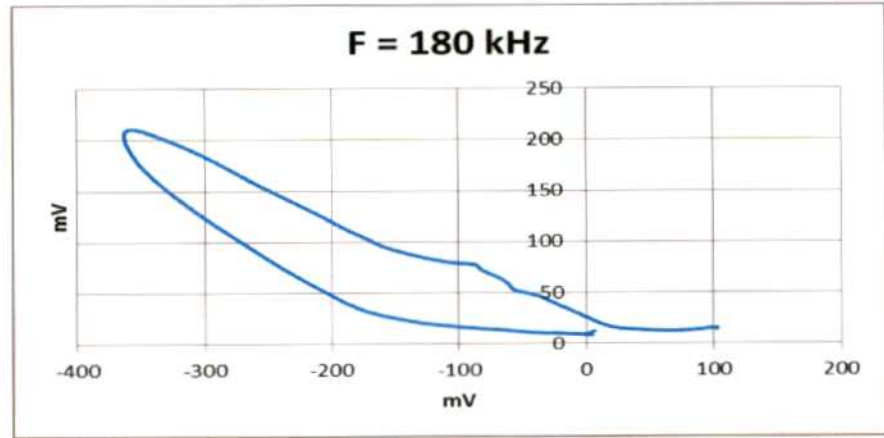
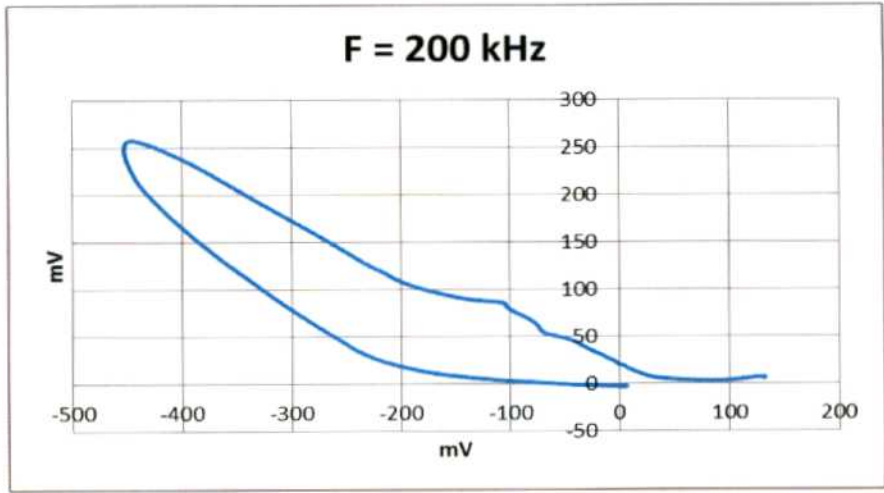
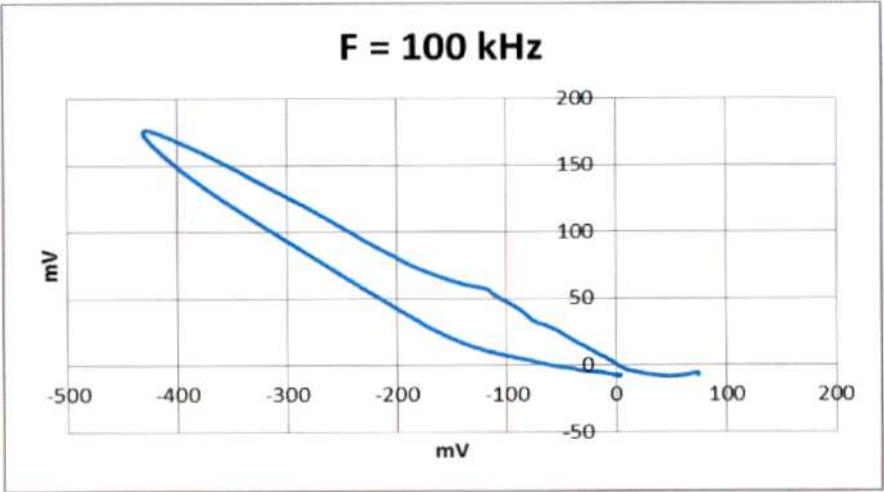


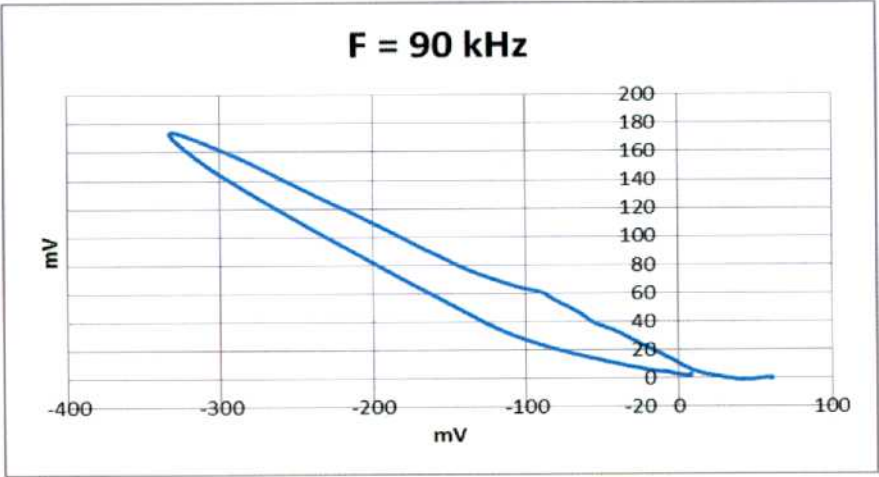
- Medición 14



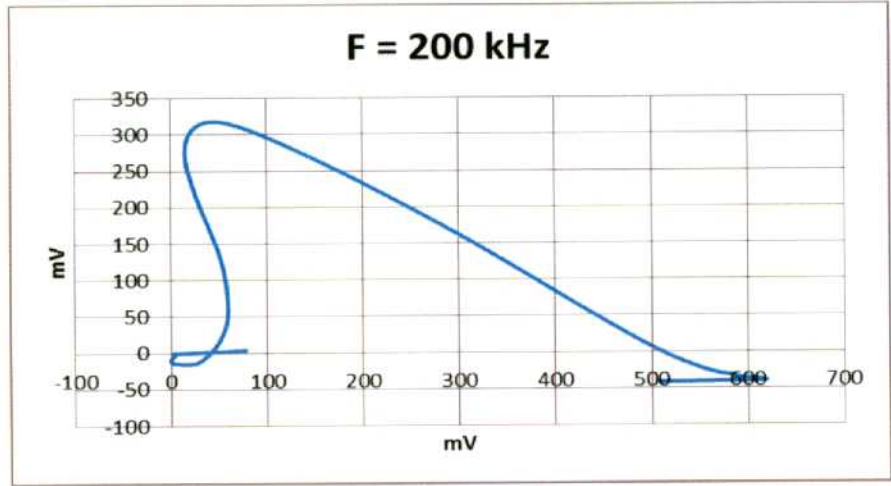
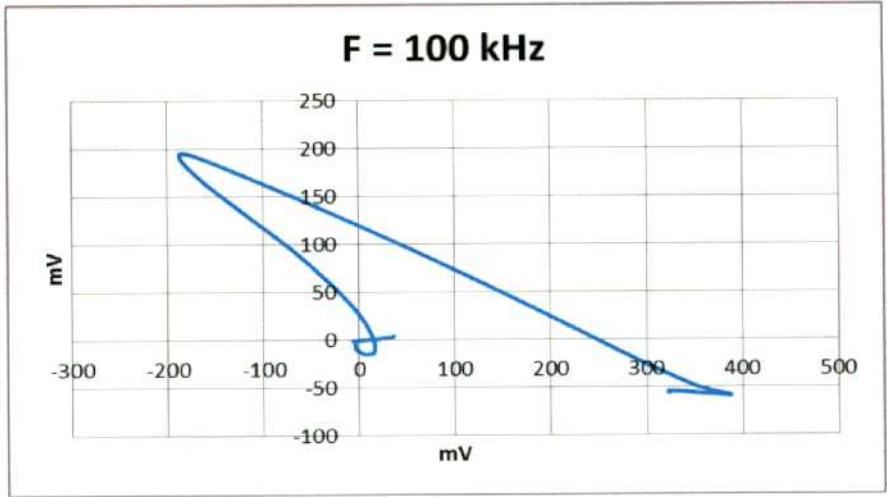


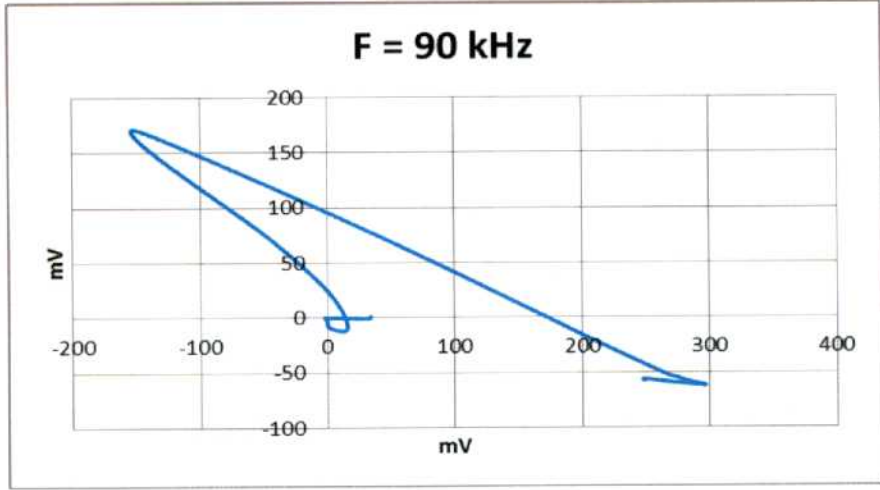
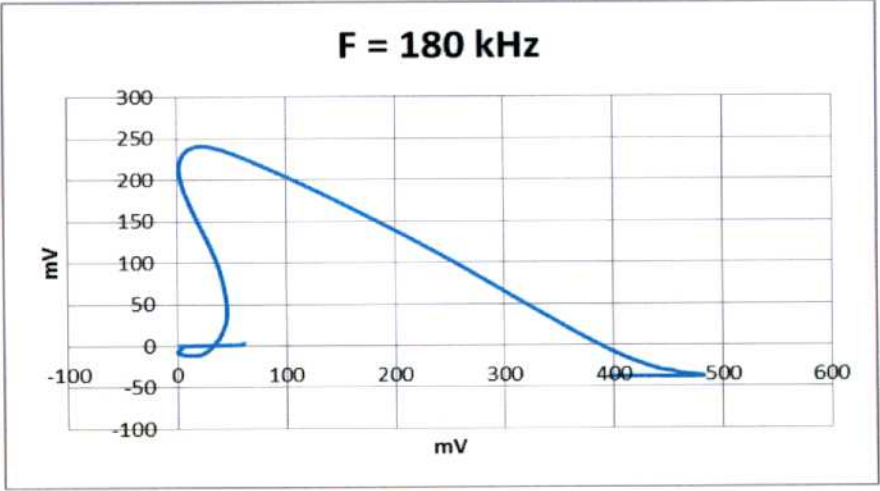
- Medición 15



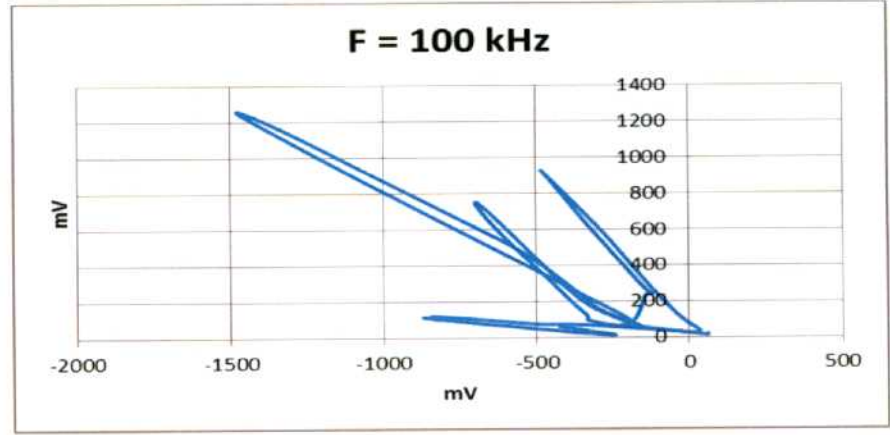


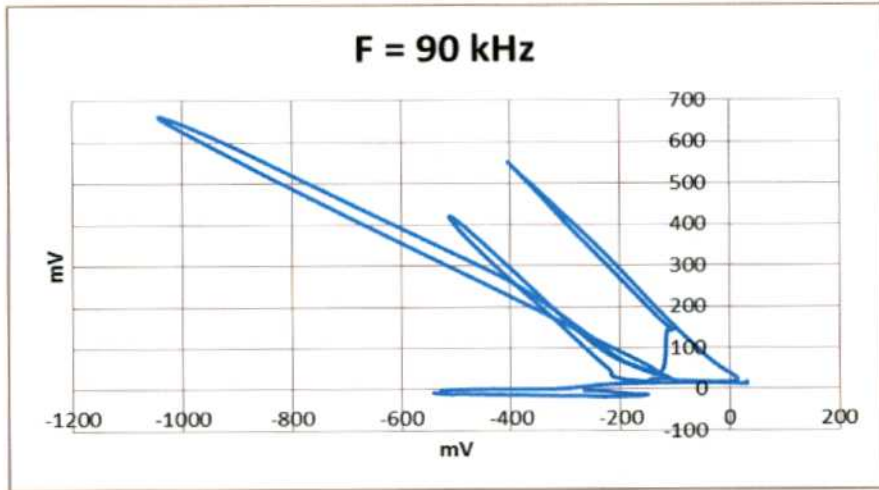
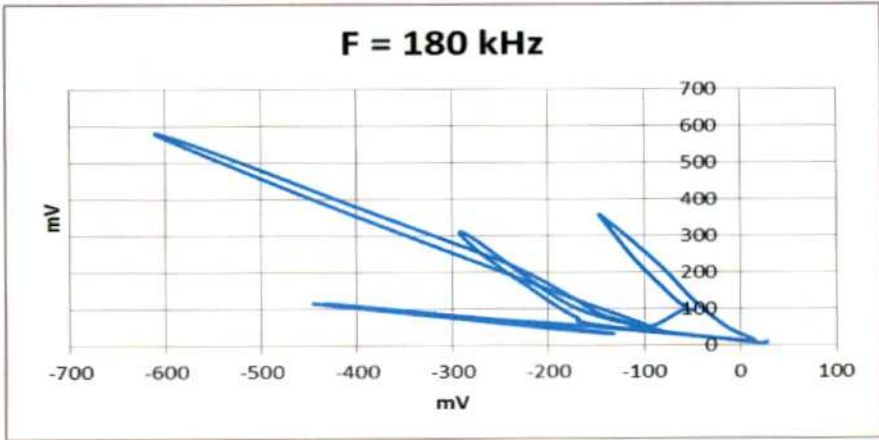
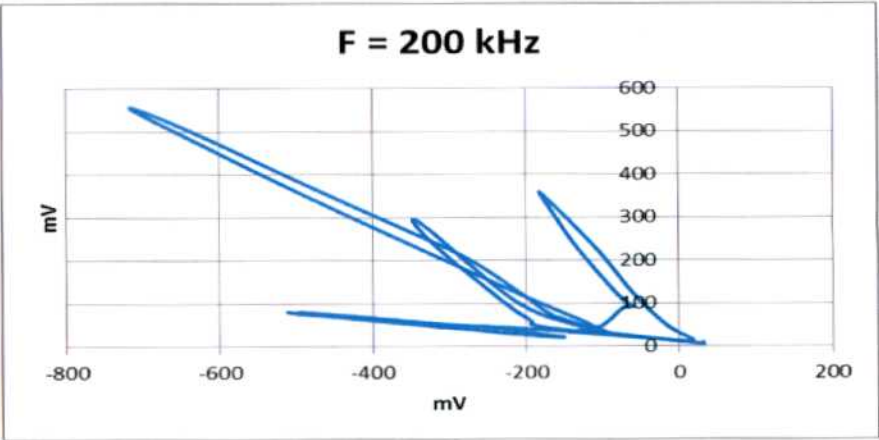
- Medición 16



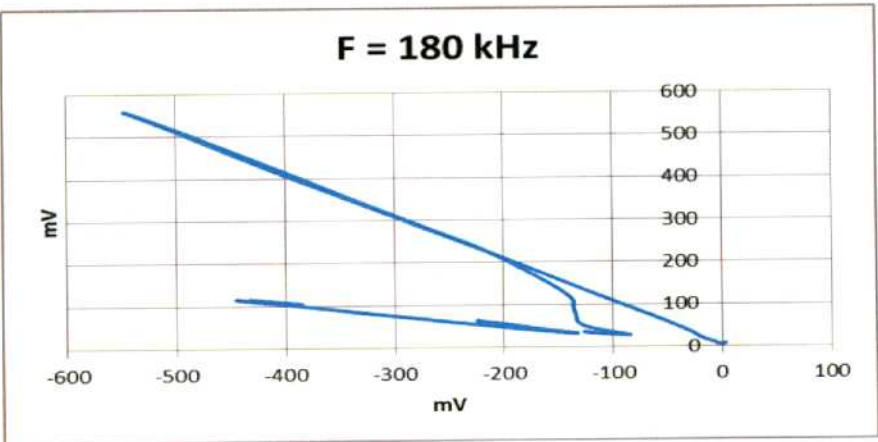
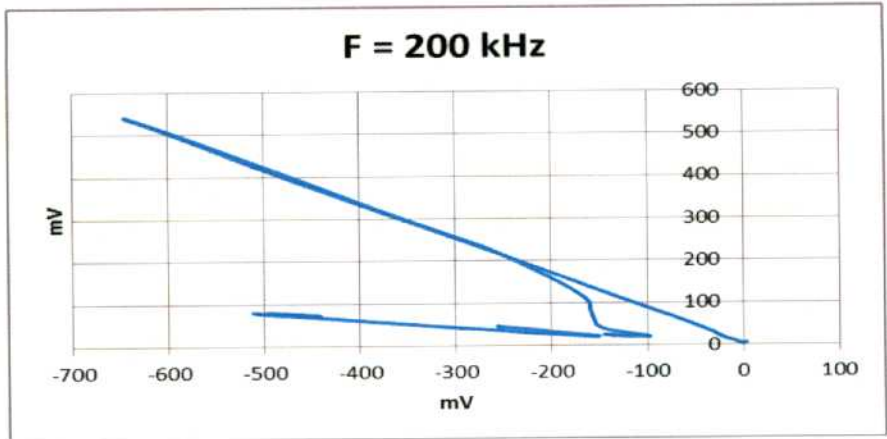
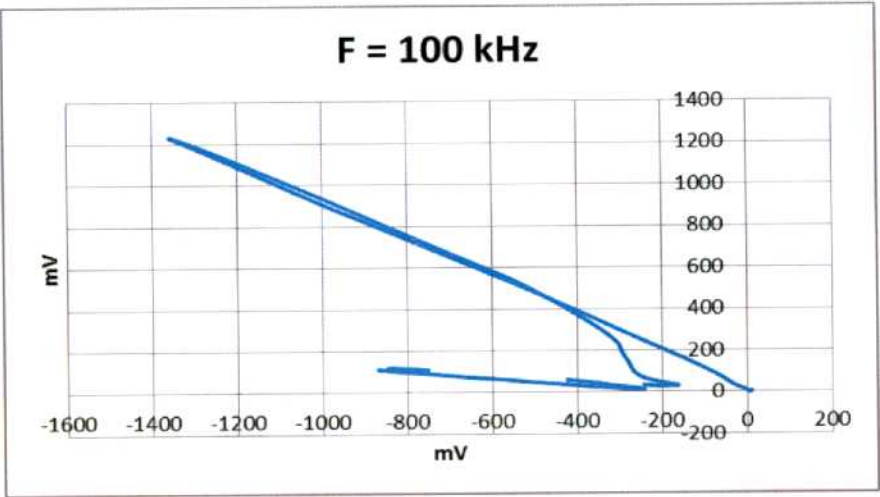


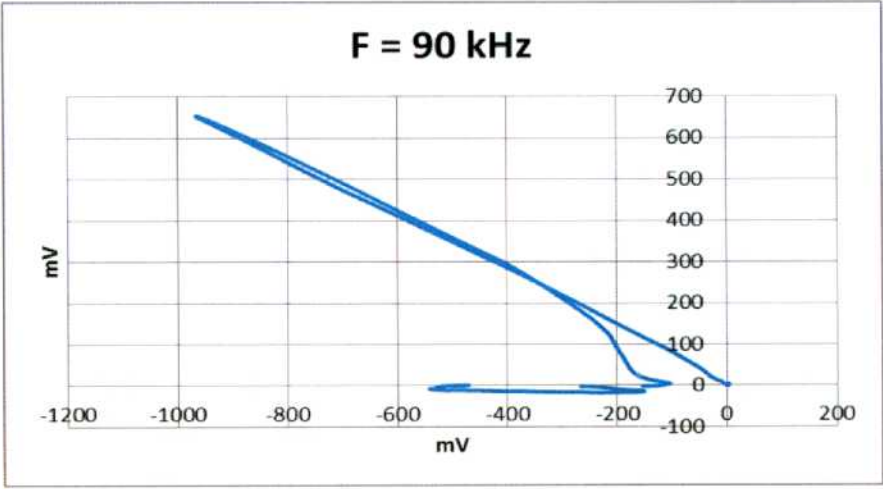
- Medición 17



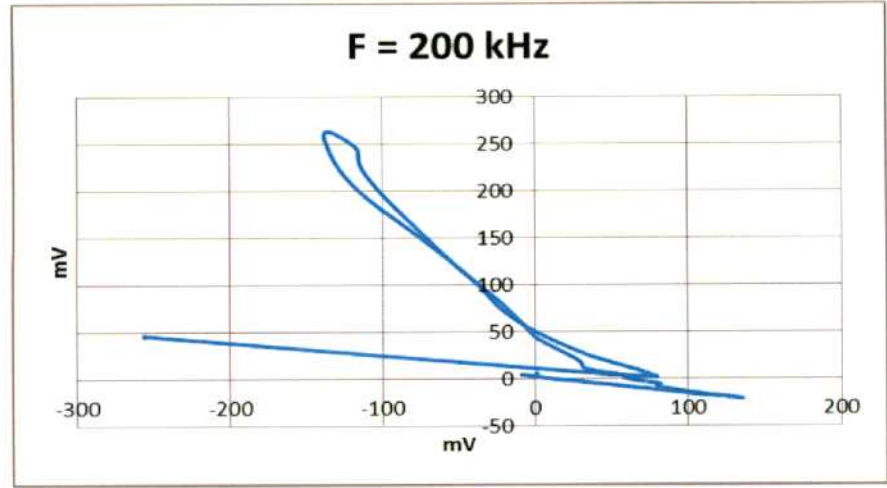
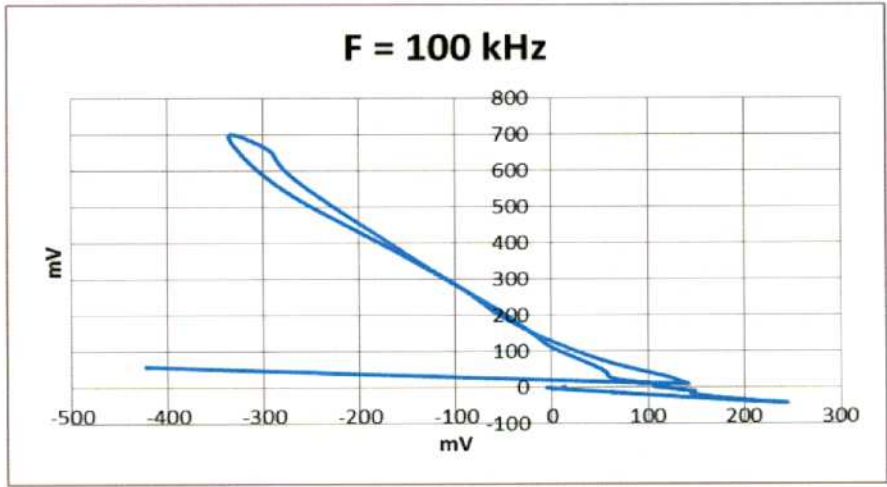


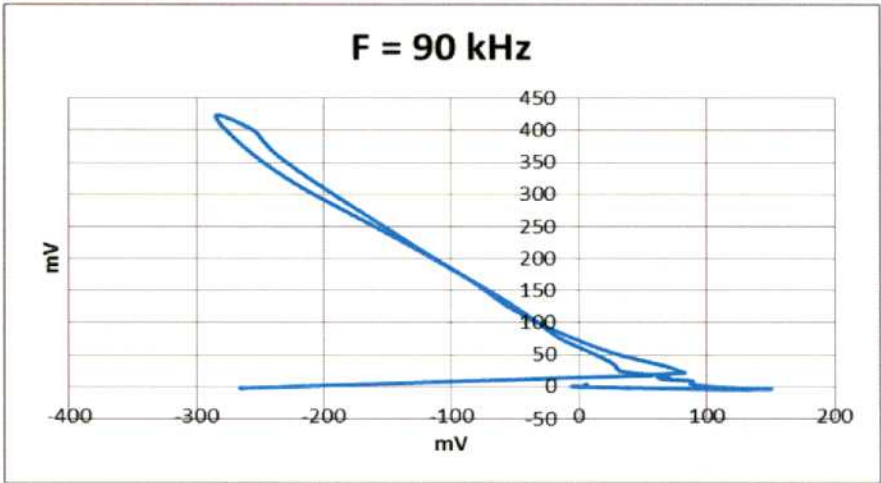
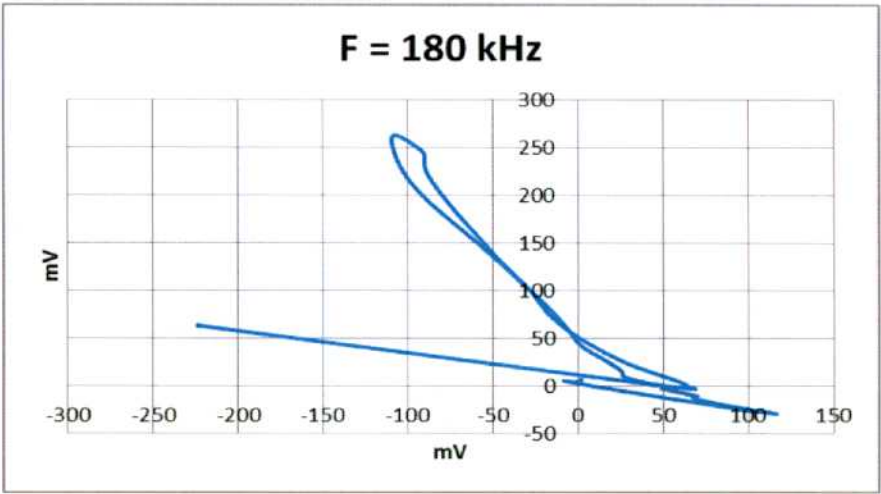
- Medición 18



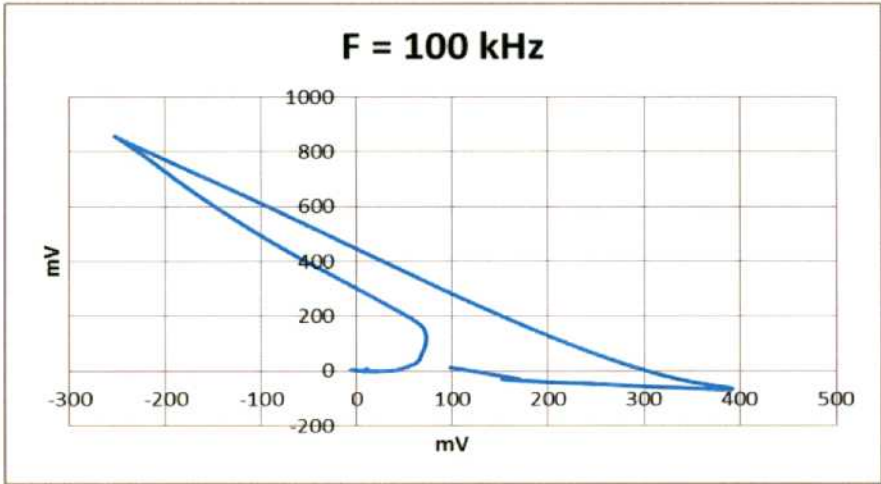


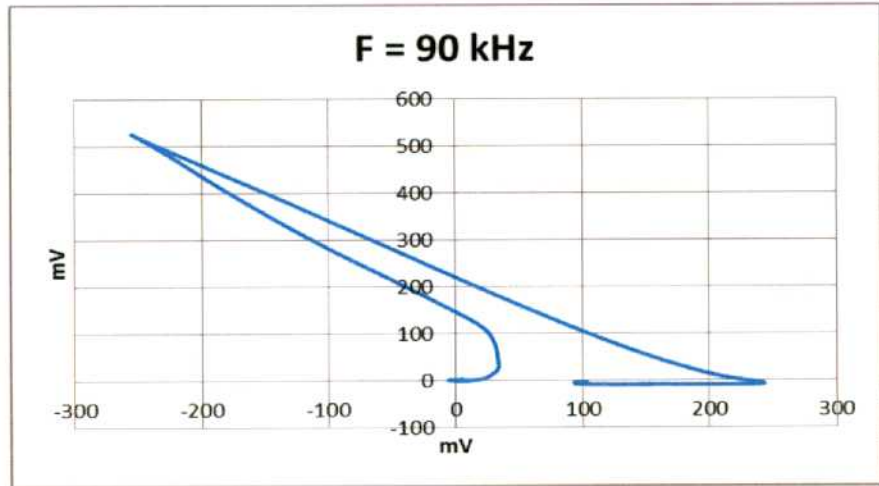
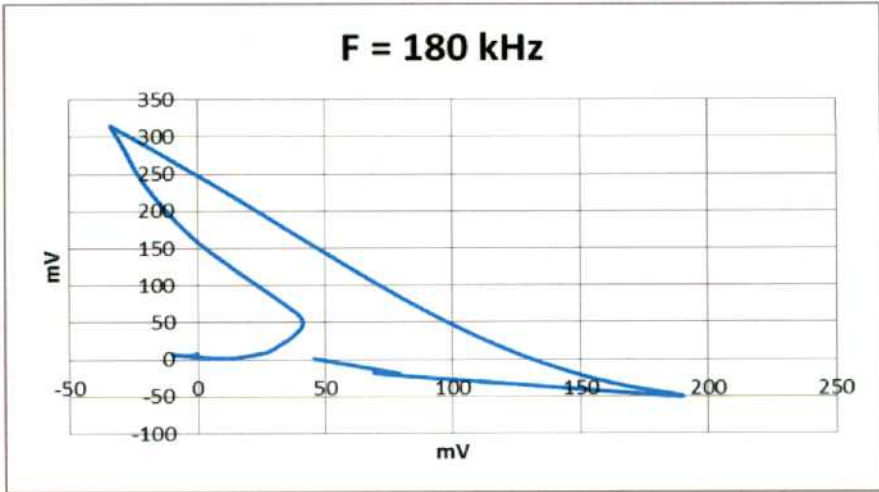
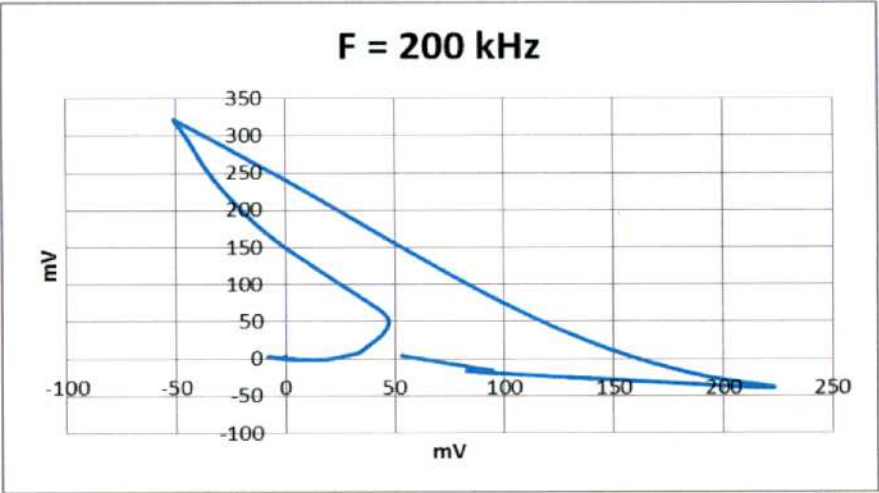
- Medición 19



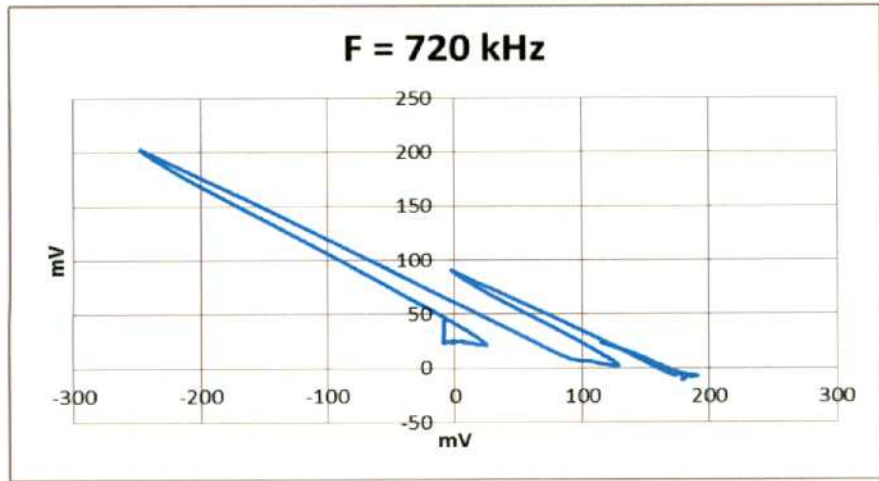
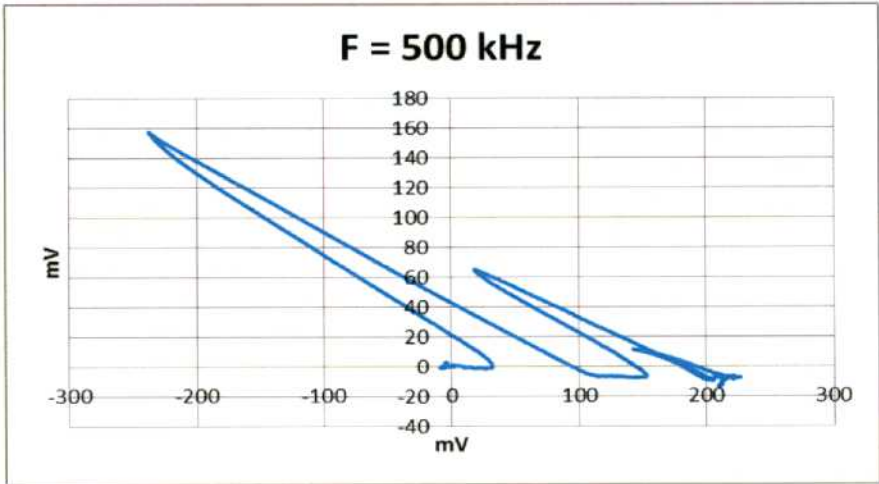
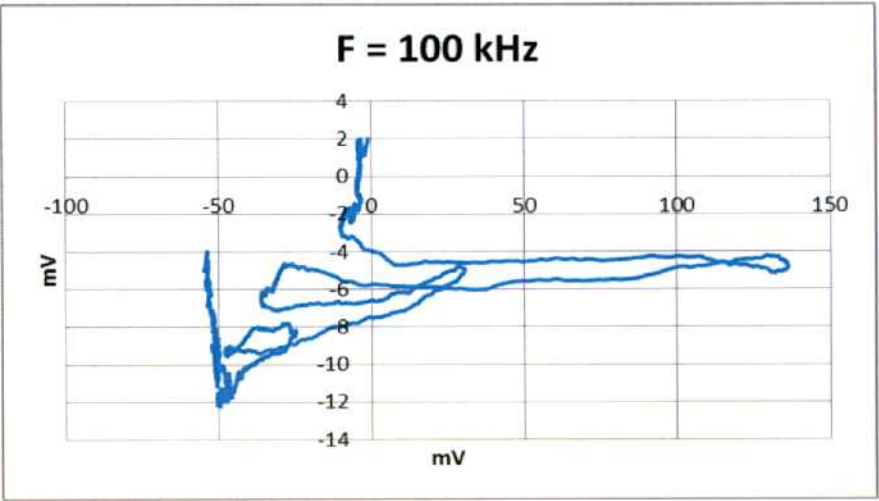


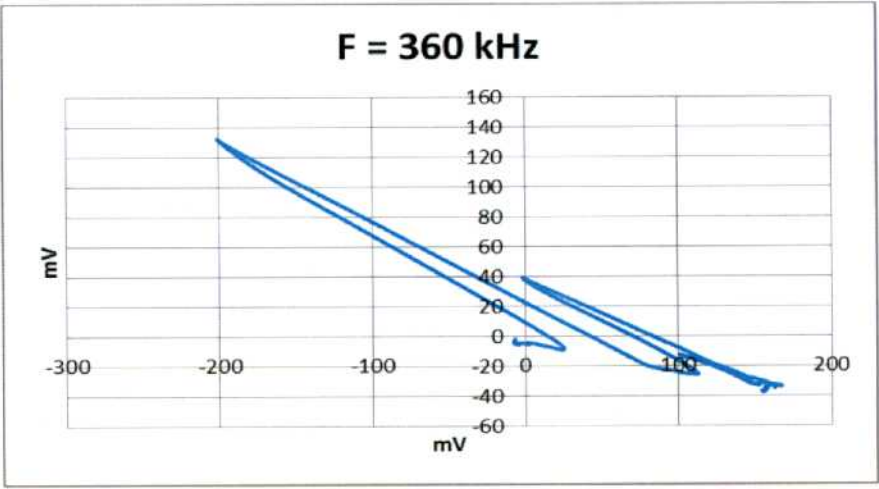
- Medición 20



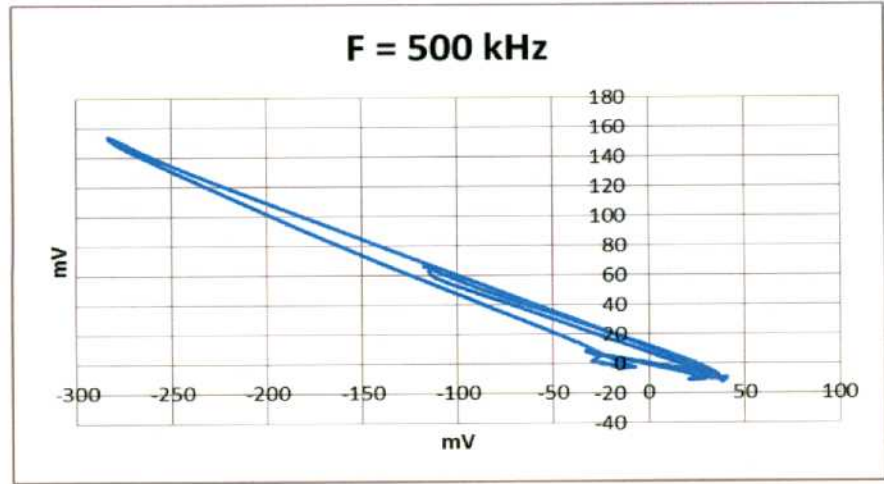
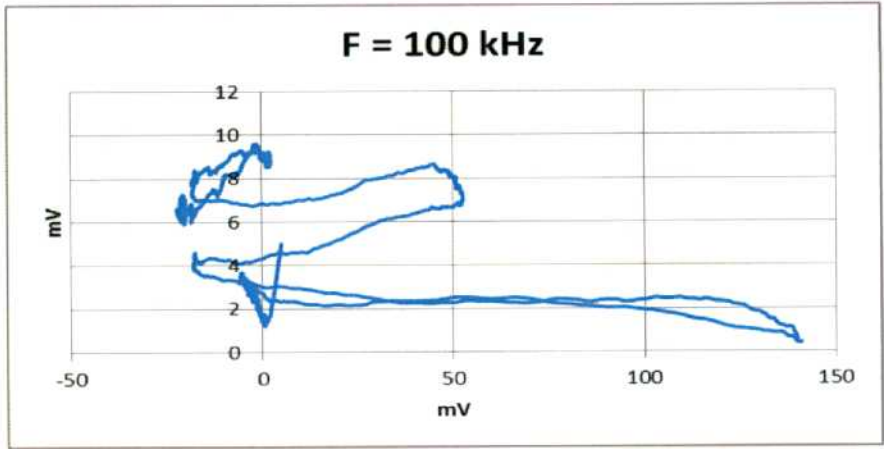


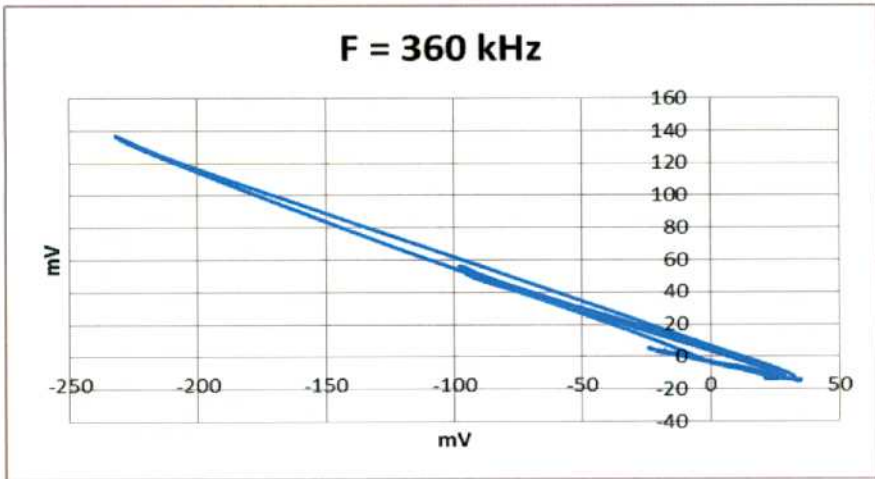
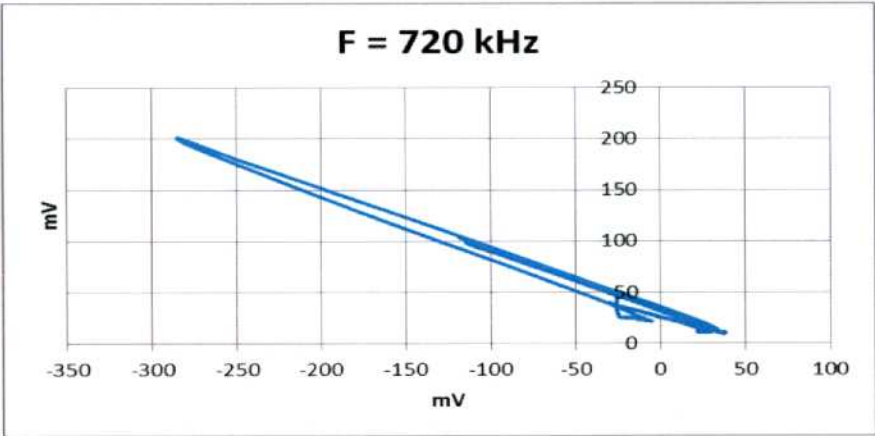
- Medición 21



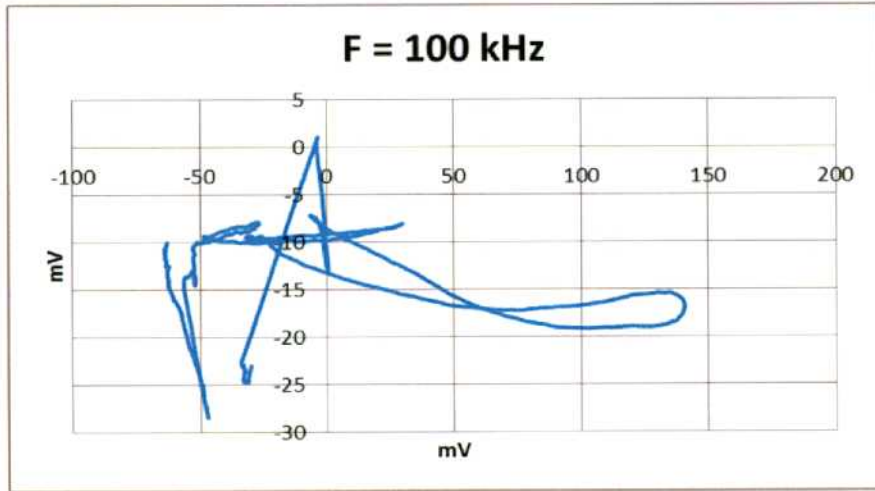


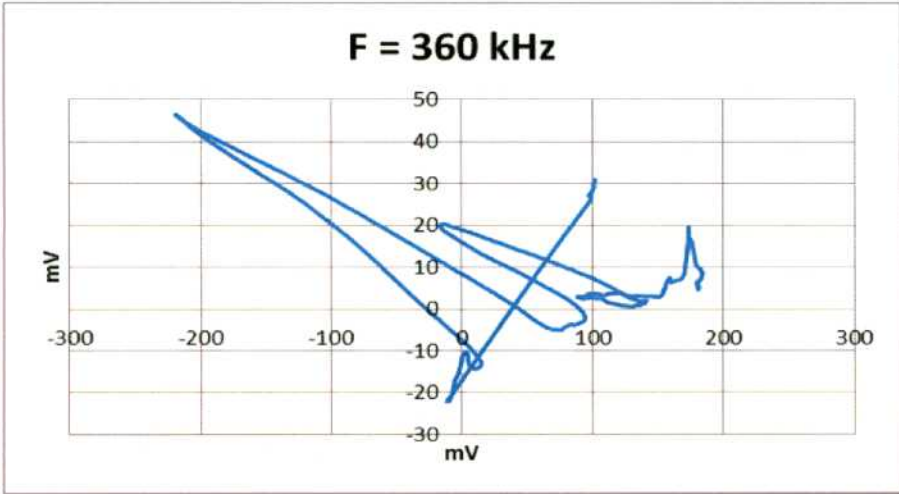
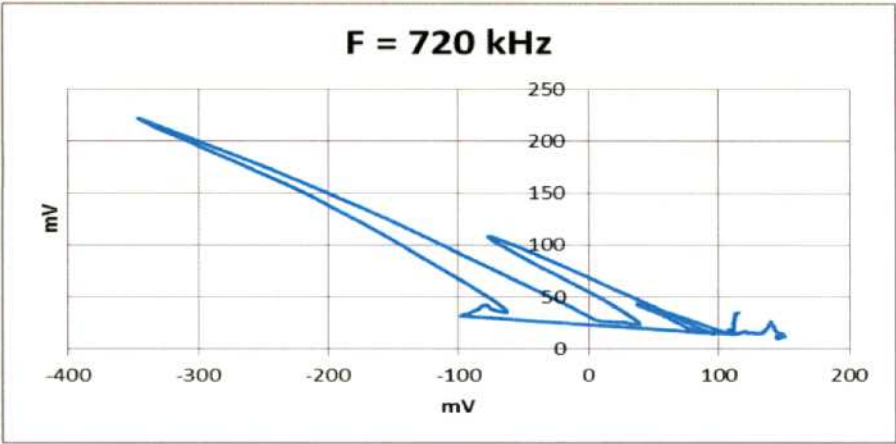
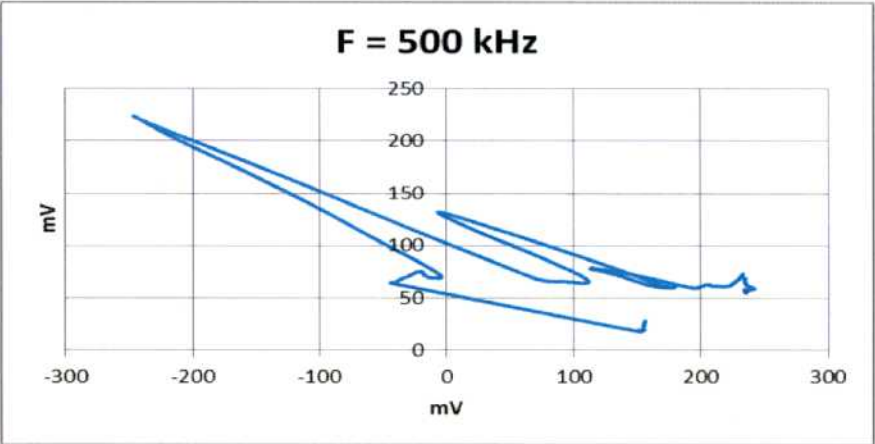
- Medición 22



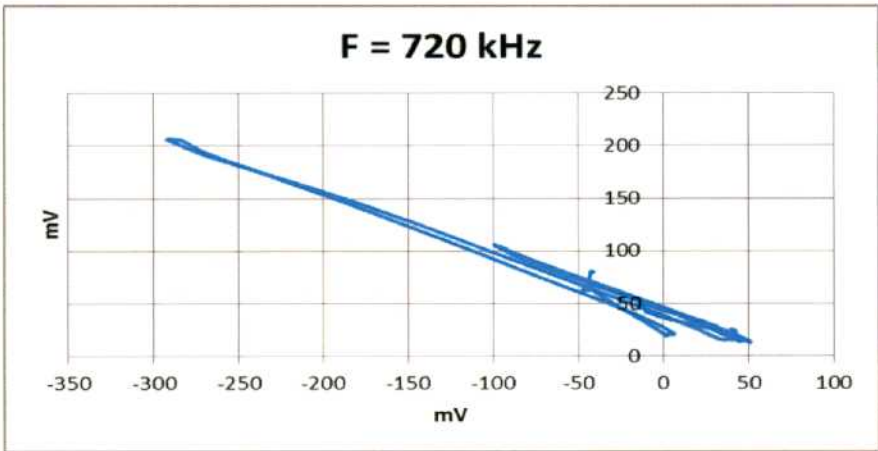
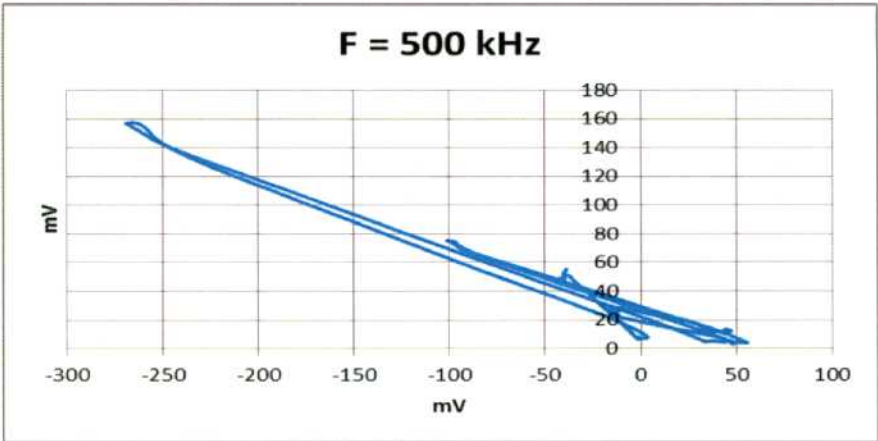
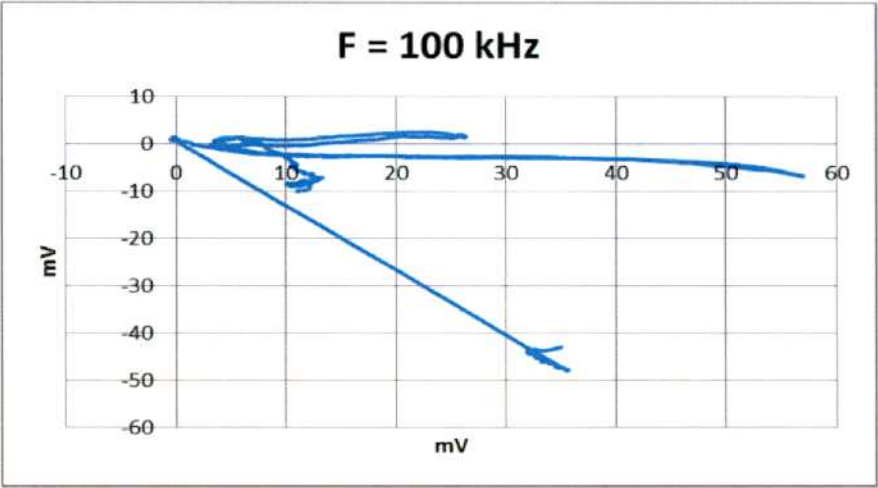


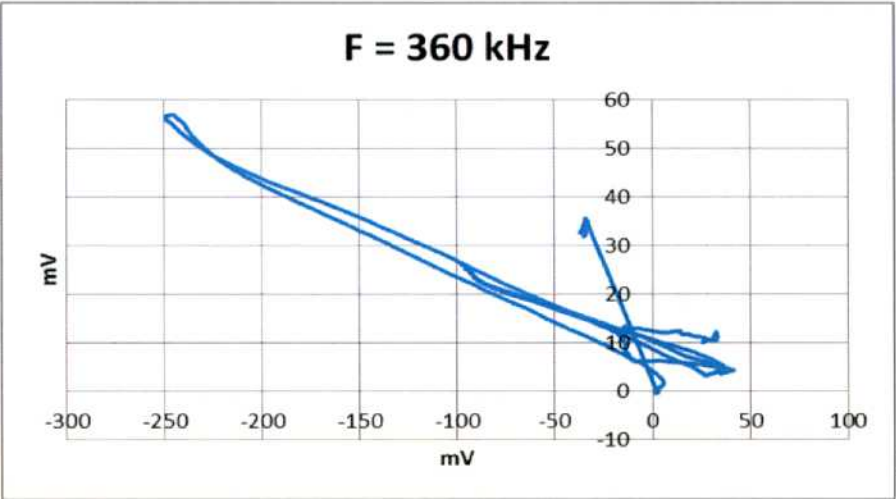
- Medición 23

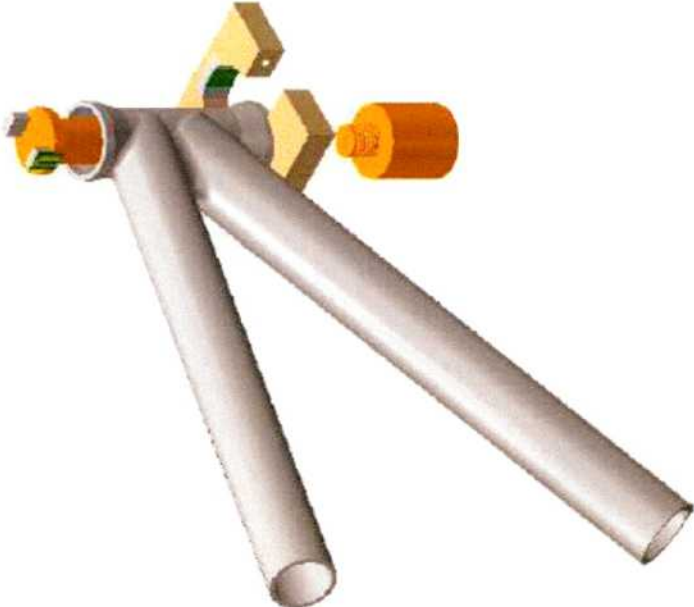




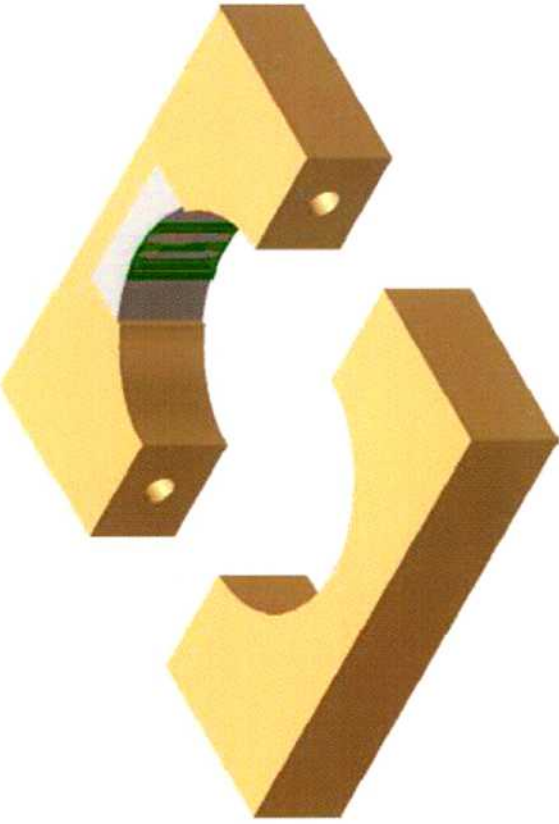
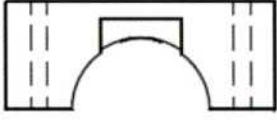
- Medición 24





									
REVISIONES									
REV	DESCRIPCION DEL PROYECTO				INGENIERO		FECHA		
1									

	DISUJO	FECHA	TODAS LAS MEDIDAS DE ENCUENTRA SON LAS MEDIDAS DE ENCUENTRA TOLERANCIAS A3		END en cuadros de Bicicletas				
	REVISIO	FECHA							
	APROB	FECHA	Tolera Dta. Menta. 8cm						
Escala		NO-ES		Ing. Matias Giorgetti		DISE NO.		1001	
INTEL		1.5				REV		1 DE 1	
MATERIAL		A4				DISE NO.		1001	
MATERIAL DE PROTECCION		A4				DISE NO.		1001	

REVISIONES									
REV	DESCRIPCION DEL PROYECTO							INGENIERO	FECHA
									
									
									
END en cuadros de Bicicletas									
LOCALIDAD: MEDIANE DE ENCANTADORA									
COORDINACION EN PROYECTO: TUBERIA DMS. Norte Ruz									
Ing. Matias Giorgetti									
SUBCONJUNTO: Sonda Externa									
REV: 0003 NO: 1003									
HOLLA DE PROTECCION									
A4									

REVISIONES									
REV	DESCRIPCION DEL PROYECTO	INGENIERO	FECHA						

5.7

15

41

15

20

		DISEÑO		FECHA		INSTITUTO VENEZOLANO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL INSTITUTO VENEZOLANO DE PATENTES		END en cuadros de Bicycletas PLANTA	
		REVISOR		FECHA					
INSTITUTO VENEZOLANO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL INSTITUTO VENEZOLANO DE PATENTES		AUTOR		FECHA		Ing. Matías Giorgetti Tulera Dto. Norte Ruc		Porta bobina conda interna REV DWG. NO. 2003 HOJA 1 DE 1	
		FECHA		FECHA					
INSTITUTO VENEZOLANO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL INSTITUTO VENEZOLANO DE PATENTES		2.1 NOVEMBRE		NOVEMBRE		Ing. Matías Giorgetti		Porta bobina conda interna REV DWG. NO. 2003 HOJA 1 DE 1	
INSTITUTO VENEZOLANO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL INSTITUTO VENEZOLANO DE PATENTES		2.1 NOVEMBRE		NOVEMBRE		Ing. Matías Giorgetti		Porta bobina conda interna REV DWG. NO. 2003 HOJA 1 DE 1	
INSTITUTO VENEZOLANO DE PROPIEDAD INDUSTRIAL INSTITUTO VENEZOLANO DE PATENTES		2.1 NOVEMBRE		NOVEMBRE		Ing. Matías Giorgetti		Porta bobina conda interna REV DWG. NO. 2003 HOJA 1 DE 1	

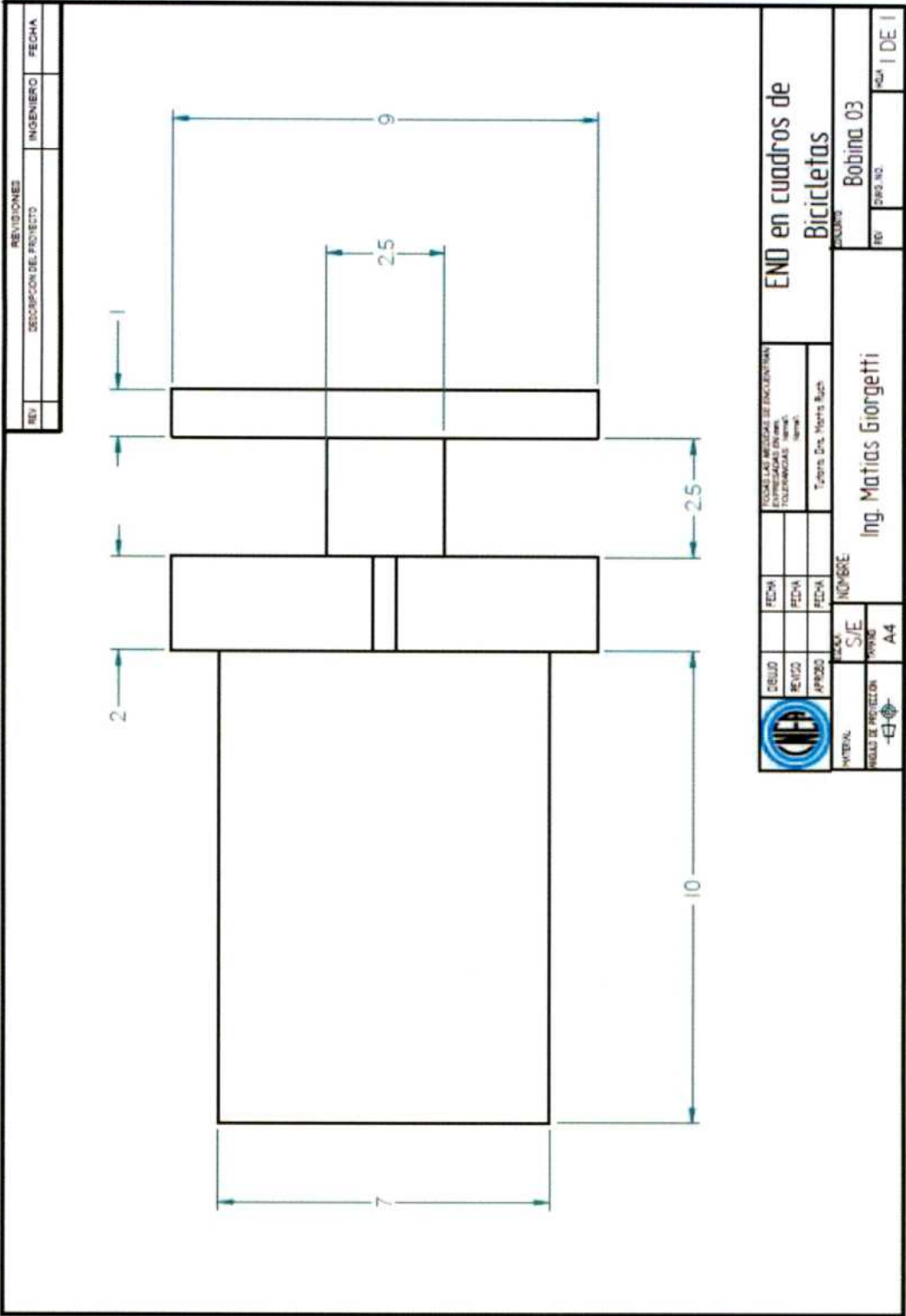
REVISIONES		INGENIERO		FECHA	
REV	DESCRIPCION DEL PROYECTO				

30

19.5

11.5

		DISEÑO FECHA:	REVISADO FECHA:	APROBADO FECHA:	TITULO Ing. Matias Giorgetti	END en cuadros de Bicicletas
		CONSULTAS MEDIDAS DE ENCLAVAMIENTO PARA ELABORAR EN MM PARA ELABORAR EN MM			TITULO Ing. Matias Giorgetti	END en cuadros de Bicicletas
AUTORE Ing. Matias Giorgetti	DISEÑO FECHA:	REVISADO FECHA:	APROBADO FECHA:	TITULO Ing. Matias Giorgetti	END en cuadros de Bicicletas	END en cuadros de Bicicletas
DISEÑO FECHA:	REVISADO FECHA:	APROBADO FECHA:	TITULO Ing. Matias Giorgetti	END en cuadros de Bicicletas	END en cuadros de Bicicletas	END en cuadros de Bicicletas



Agradecimientos

A mi directora de tesis la Dra. Marta C. Ruch, por su compromiso, guía, experiencia y sinceridad sobre todo.

Al Mag. Javier Fava, por su colaboración en los ensayos y consultas permanentes.

Al taller, en especial a Esteban, por la fabricación de todos los elementos de medición.

A todo el departamento de Ensayos no Destructivos, en especial a Adrián Bonomi, por su colaboración en la preparación de los ensayos.

Al Laboratorio de Radiografía Industrial del ENDE, en especial a Mauricio Tacchia y Emilio Olivar (H).

A mi familia y a mi novia Virginia por el apoyo constante recibido a lo largo de todo este proyecto.

A mis compañeros de maestría.

A todo el personal administrativo del Instituto Sábato.

Referencias Bibliográficas

- ¹“Estudios no destructivos de fisuras en cuadros de bicicleta”. M. Ruch. IN-13-E-070-IM/10, 2010. Informe interno de CNEA
- ² EN 14764 “City and trekking bicycles - Safety requirements and test Methods” – December 2006
- ³ UNE-EN-AENOR 14766 “Bicicletas de montaña: Requisitos de seguridad - Métodos de ensayo” - Octubre 2006
- ⁴ Norma IRAM 40020 “Bicicletas. Requisitos de seguridad” – Octubre 2005
- ⁵ Registration Record of international alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys. www.aluminum.org/
- ⁶ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag. 137.
- ⁷ www.aluminiumdesign.net/design-support/aluminium-alloys/
- ⁸ M. Glassel. Tratamientos térmicos de aleaciones de aluminio. Aluvi – Mayo 2001
- ⁹ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag. 42-76
- ¹⁰ aluminium.matter.org.uk
- ¹¹ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 404
- ¹² ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 404 - 405
- ¹³ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 428 - 431
- ¹⁴ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 428 - 431
- ¹⁵ www.dahonbikes.com
- ¹⁶ www.columbustubi.com
- ¹⁷ M. Ruch, M. Giorgetti, “Fisuras en cuadros de Mountain bike. Ensayos no destructivos”, TALMA 2011, La Plata, Mayo 2011.
- ¹⁸ M. Giorgetti, M. Ruch, J. Fava, “Inspección de cuadros de mountain-bike”, 8^{vo} CORENDE, Campana, Agosto 2011
- ¹⁹ www.infobarrel.com/Media/bicycle_frame_materials
- ²⁰ Ing. Akram Rachid Jafar, “Manual para preparación y corrección del herramental de matricería para extrusiones de aluminio”
- ²¹ Comunicación Personal, Alberto Forcato.
- ²² ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 142-143
- ²³ “Hidroconformado – Aproximación a tecnologías emergentes” OTEA – AIME 01/11/09
- ²⁴ www.aluminiumdesign.net
- ²⁵ “Fabrication Instructions for 6061 and 7005 Tube Sets”, Easton.
- ²⁶ “Technology Report Al Alloys”, Easton.
- ²⁷ “Tubing shapes up”, Easton.
- ²⁸ “The eddy current inspection method Part 1. History and electrical theory”. J Hansen

- ²⁹ V.S. Cecco, G. Van Drunnen y F.I. Sharp. Manual de ensayos por corrientes inducidas. Atomic Energy of Canada, Limited, (1981).
- ³⁰ "Corrientes Inducidas - Especialización en ensayos no destructivos Capitulo 1", A Obrutsky, D. Acosta, J. Mendez
- ³¹ "The eddy current inspection method Part 2. The impedance plane and probes" J Hansen
- ³² "Design, Construction and Characterization of ECT Sensors with Rectangular Planar Coils", J. Fava, M. Ruch, Insight 46(5), 2004, 268-274.
- ³³ "Diseño y construcción de sondas para ensayos por corrientes inducidas conteniendo bobinas planas rectangulares", Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, IT-UNSAM, de J. Fava. 2002-2003
- ³⁴ "Calculation and simulation of impedance diagrams of planar rectangular spiral coils for eddy current testing", J. Fava, M. Ruch, NDT&E Int. 39(5), 2006, 414-424. ISSN 0963 8695
- ³⁵ "Operating Manual – 1260 Impedance / Gain-Phase Analyser", Solartron Analytical
- ³⁶ [http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Probe sCoilDesign/diameter.htm](http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Probe%20CoilDesign/diameter.htm)
- ³⁷ http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html
- ³⁸ [www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/general_engineering_plates/es/ 7xxx_ES.pdf](http://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/general_engineering_plates/es/7xxx_ES.pdf)
- ³⁹ ASM Metals HandBook Volume 2 - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Mat Pag 134-136
- ⁴⁰ "Fundamentos de mecánica de fractura su aplicación a la industria nuclear" Autor: Electric Power Research Institute, 1992, Modulo Mecánica de Fractura – Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales
- ⁴¹ J. E. Perez Ipiña, Mecánica de Fractura, Librería y Editorial Alsina, 2005
- ⁴² Modulo Mecánica de Fractura – Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales
- ⁴³ [spaceflight.esa.int/impress/text/education/Images/MechanicalProperties/Image046. png](http://spaceflight.esa.int/impress/text/education/Images/MechanicalProperties/Image046.png)
- ⁴⁴ "Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame", Worcester Polytechnic Institute, Forrest Dwyer, Adrian Shaw and Richard Tombarelli. 04/2012
- ⁴⁵ UNE-EN-AENOR 14766 "Bicicletas de montaña: Requisitos de seguridad - Métodos de ensayo"
- ⁴⁶ "Diseño de una bicicleta de Montaña", Universidad de Malaga, D. Javier Lopez Martinez, 11/2005
- ⁴⁷ "Analysis of the cracking causes in an aluminium alloy bike frame" Cicero-Lacalle- analysis- 317
- ⁴⁸ Seib E, Kocak M. Fracture analysis of strength undermatched welds of thin-walled aluminium structures using FITNET procedure. IIW Doc X-1577-2005; 2005
- ⁴⁹ Metals Handbook. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. 10th ed. vol. 2. ASM International; 1990.
- ⁵⁰ ASM Material Hardness
- ⁵¹ "Thermal imaging cameras help detect material failures in bicycles", Newsdesk, Insight 53(11), 2011, 594