

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA
“Profesor Jorge A. Sabato”**

**Determinación no destructiva simultánea de
propiedades eléctricas y magnéticas en materiales
levemente ferromagnéticos**

por Ing. Alejandro E. Lois

Director

Dra. Marta Ruch

(*) Tesis para optar al título de *Doctor en Ciencia y Tecnología, Mención Materiales*

República Argentina

2008

AGRADECIMIENTOS:

Deseo expresar mi agradecimiento a:

- Liliana por todo su apoyo
- Marta Ruch por su dirección y paciencia
- María Ortiz Albuixech (Maruja), Marta Granovsky, Alicia Pietragalli y Daniel Vega por su ayuda con los ensayos de difracción de rayos X
- José Marengo por el préstamo de las probetas
- Guillermo Anteri por su ayuda con el tema de los aceros inoxidables austeníticos
- Sara Novas y Adriana Domínguez del MEB
- Ramón y Ricardo de Metalografía
- Melanie Kopp e Iris Altpeter por dejarnos utilizar el 3MA
- Jorge Ferrante por haberme “incitado” a iniciar este recorrido
- la Universidad Tecnológica Nacional que me otorgó la beca que me permitió realizar este postgrado
- Eugenio Ricciolini, Decano de la Facultad Reg. Gral. Pacheco de la UTN
- Daniel Bosio, Beatriz Olivetto y a FAGDUT

ÍNDICE:

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
PROLOGO	5
CAPITULO I: Los aceros inoxidables austeníticos	6
1.1. Definición de un acero inoxidable	6
1.2. Resumen histórico	7
1.3. Tipos y clasificación de los aceros inoxidables	9
1.4. Los aceros inoxidables austeníticos AISI 304	11
1.5. Transformación martensítica	13
1.6. Aparición de ferrita en soldaduras	21
1.7. Materiales magnéticos	22
CAPITULO II: Desarrollo del modelo matemático	24
2.1. Introducción	24
2.2. Desarrollo del modelo analítico	26
2.3. De las ecuaciones de Maxwell a la ecuación del potencial vectorial	27
2.4. Solución de la ecuación del potencial vectorial	31
2.5. Simulaciones computacionales	39
CAPITULO III: Ensayos no destructivos por corrientes inducidas	42
3.1. Materiales	42
3.2. Ensayos no destructivos por corrientes inducidas	44
3.2.1. Adquisición De Datos	44
3.2.2. Representación de los datos obtenidos en el plano complejo de impedancias	49
3.2.3. Cálculo de las propiedades electromagnéticas	61
CAPITULO IV: Ensayos complementarios	67
4.1. Ensayos de Difracción de Rayos X	67
4.1.1. Análisis de los diagramas	70
4.1.2. Resultados	72
4.2. Ensayos con el equipo 3MA	74
4.2.1. Medidas de Ruido Barkhausen	75
4.2.2. Permeabilidad incremental	78

CAPITULO V: Análisis de los resultados	81
5.1. Relación entre la permeabilidad magnética y el contenido de martensita	81
5.2. Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita	83
5.3. Estimación de la proporción de martensita en aceros inoxidables	88
5.4. Relación entre magnitudes medidas con 3MA y el contenido de martensita	90
CAPITULO VI: Discusión	92
6.1. El modelo matemático	92
6.1.1. Hipótesis del modelo	94
6.2. Ensayos por corrientes inducidas	98
6.3. Cálculo de las propiedades electromagnéticas	100
6.4. Ensayos por Difracción de Rayos X	101
6.5. Estimación de la proporción de martensita en aceros inoxidables	102
6.6. Ensayos con el equipo 3MA	103
CAPITULO VII: Conclusiones	104
7.1. Conclusiones	104
7.2. Trabajos por realizar	105
APÉNDICE I: Función Impedancia	106
APÉNDICE II: Programa para procesar archivos de datos generados por el equipo de corrientes inducidas MAD8D	107
APÉNDICE III: Programa para determinar la matriz T	109
APÉNDICE IV: Programa para calcular conductividad eléctrica	110
APÉNDICE V: Programa para calcular permeabilidad magnética relativa	111
APÉNDICE VI: Tablas de los ensayos de corrientes inducidas	112
APÉNDICE VII: Tablas de los ensayos por Difracción de Rayos X	119
APÉNDICE VIII: Método magnético para medir contenido de martensita	121
APÉNDICE IX: Tablas de la relación entre Z y $\% \bullet$	123
APÉNDICE X: Publicaciones y presentaciones en Congresos	125
BIBLIOGRAFIA	126

RESUMEN

Frecuentemente se observa, a causa de los procesos de fabricación de componentes de acero inoxidable austenítico, tales como embutido, trefilado, rectificado o bruñido, la transformación martensítica (transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha'$). La aparición de martensita en un acero inoxidable austenítico trae aparejada una disminución de la velocidad de deformación en tracción, lo cual afecta su facilidad de fabricación, pero, más importante aún, resulta perjudicial a sus propiedades de resistencia a la corrosión bajo tensión y a la resistencia a la fragilización por hidrógeno. Por otra parte, en ciertas aplicaciones, el aumento de las características mecánicas, debido a la aparición de martensita, es aprovechado, por ejemplo, para la fabricación de resortes.

Por esto el conocimiento de la proporción de martensita presente en un acero inoxidable austenítico es muy importante, más aun si se obtiene en forma no destructiva. Un método aplicable a esto es el de corrientes inducidas, cuyas señales contienen información sobre las propiedades del material. En este trabajo se desarrolla una técnica para extraer esta información (proporción de martensita, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética) de las señales de corrientes inducidas obtenidas con un equipo convencional. A partir del modelado de la impedancia (Z) de sondas acopladas a materiales magnéticos, y mediante una calibración adecuada, puede estimarse la proporción mencionada, así como también los valores de las propiedades electromagnéticas mencionadas. Para el desarrollo del presente método, se utilizaron probetas de aceros inoxidables austeníticos tipo AISI 304, 316 y 347, con diferentes contenidos de martensita α' , a las que se ensayó con un equipo de corrientes inducidas MAD8D™. Las tensiones medidas en los ensayos fueron transformadas matemáticamente al plano de impedancia y se las comparó con las curvas de Z teóricas, observándose una buena correspondencia. Se verificó una relación lineal entre las componentes de Z experimental y el contenido de α' de las probetas, a partir de la cual, y con la calibración adecuada, se puede estimar dicho contenido.

Una vez obtenidas curvas de Z experimental, con un software diseñado al efecto, se calcularon los valores de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética de las tres series de aceros inoxidables.

Las tres series de probetas fueron ensayadas en un difractómetro de rayos X. Se procesaron todos los datos obtenidos a partir de estos ensayos, realizándose el ajuste del diagrama experimental mediante diagramas simulados por el programa PowderCell, obteniéndose las proporciones de martensita y austenita presentes en cada muestra de cada serie de aceros inoxidables. Estos resultados se compararon con los obtenidos en ensayos no destructivos por corrientes inducidas obteniéndose una buena correspondencia entre ellos.

Se analizaron los resultados de los ensayos realizados en el Departamento de Materiales del Instituto Fraunhofer de Ensayos no Destructivos, de la ciudad de Saarbrücken, República de Alemania, donde se ensayó la serie de probetas AISI 347, con el equipo 3MA, el cual utiliza las técnicas de ruido Barkhausen, permeabilidad incremental y corrientes inducidas en simultáneo. Con este análisis se comprobó el comportamiento ferromagnético de algunas muestras de esta serie. Se estudió también el alcance y las limitaciones de las diferentes técnicas aplicadas.

ABSTRACT

Martensitic transformation is often observed in manufacturing processes of austenitic stainless steel components, such as embedding, drawing, grinding or burnishing. The existence of martensite in an austenitic stainless steel implies a decrease in the tensile strain rate, which affects its manufacturing and, especially, its resistance to stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement. On the other hand, the increase of the mechanical properties due to martensite is useful for some particular applications, such as spring manufacturing.

Hence, to know the amount of martensite in an austenitic stainless steel is very important, especially if the martensite is quantified through a nondestructive technique. Eddy current testing (ect) is an applicable method, the signals displaying information about the properties of the material. In this work a technique was developed to extract that information from ect signals obtained with a conventional equipment. This martensite content could be estimated from the impedance modeling (Z) of probes coupled to magnetic materials, and through adequate calibration. For the development of this method, AISI 304, 316 and 347 austenitic stainless steel specimens were used with different contents of α' martensite, which were tested with an ect MAD8D™ equipment. Voltages measured during testing were mathematically transformed into the impedance plane and were compared with theoretical Z curves, showing a good correspondence. A linear relationship between the experimental Z components and the α' content of the specimens was verified, which makes this procedure suitable for the assessment of the martensite content in this type of stainless steels if adequate calibration pieces are available.

An ad hoc software for the calculation of the electrical conductivity and magnetic permeability of the specimens was programmed and used. The input to this software are the calculated are the transformed Z -values and it was applied to all the specimens.

All three series of specimens were studied in an X-ray diffractometer. The resulting diagrams were processed, the adjustment being performed with the PowderCell software, thus calculating the fractions of martensite and austenite in the specimens. These results were compared with those from ect, a good correspondence being observed.

The tests made on the 347-series at the Materials Department of the Fraunhofer NDT Institute (IZFP), Saarbrücken, Germany are also discussed in what follows. They were made with the 3MA equipment, which simultaneously uses Barkhausen noise, incremental permeability and eddy currents. The ferromagnetic behaviour of some of the specimens in the series was observed with the Barkhausen and permeability techniques. The scope of the different techniques is studied.

PRÓLOGO

Este trabajo, como se ha mencionado, consiste en investigar si es posible caracterizar probetas de aceros inoxidable austeníticos, con un equipo convencional de ensayos de corrientes inducidas.

En el Capítulo I se realiza un breve estudio acerca del material empleado en la investigación, desde los aceros inoxidable en general, hasta los aceros inoxidable austeníticos, en particular, y de la transformación martensítica que pueden sufrir estos últimos.

En el segundo capítulo se presenta el desarrollo del modelo matemático, que fue necesario realizar para poder transformar la información que brinda el equipo de ensayos de corrientes inducidas.

En el siguiente capítulo, el tercero, se describe todo lo concerniente a los ensayos de corrientes inducidas realizados: los materiales y equipo empleados, el método experimental seguido y los resultados obtenidos.

El Capítulo 4 trata de los ensayos complementarios realizados para contrastar los resultados obtenidos en los ensayos de corrientes inducidas, una breve descripción de los mismos y los resultados obtenidos.

El quinto capítulo consiste en el análisis de todos los resultados obtenidos y de las relaciones funcionales entre las distintas magnitudes medidas y calculadas.

Finalmente, en el Capítulo 6, se encuentra la discusión del trabajo y a continuación las conclusiones.

CAPITULO I

Los aceros inoxidables austeníticos

1.1 Definición de un acero inoxidable

Acero inoxidable es el nombre genérico que se le da a una cierta cantidad de aceros diferentes, que se usan principalmente por su resistencia a la corrosión. La condición común que ellos comparten es una cierta proporción mínima (en masa) de cromo: 12 o 13 %. También se agregan otros elementos, particularmente níquel y molibdeno, para incrementar la resistencia a la corrosión, aunque el cromo es siempre el factor decisivo [1, 2, 3, 4, 5]. Es esta característica la que le da a los aceros inoxidables su nombre. Sin embargo, inmediatamente después de su descubrimiento, se observó que el material tenía otras características valiosas que lo hacían conveniente para una extensa gama de aplicaciones diversas. En efecto, el número de aplicaciones en las cuales se puede usar un acero inoxidable es casi ilimitado, por ejemplo:

- En el hogar:
 - Cuchillería, platos y otros artículos de mesa
 - Piletas y mesadas de cocina
 - Recipientes de cocción
 - Hornos
- En la ciudad:
 - Cobertizos, cabinas de teléfono y otros elementos del mobiliario urbano
 - Fachadas de edificios
 - Elevadores y escaleras mecánicas
 - Trenes subterráneos e infraestructura de las estaciones
- En la industria:
 - Equipos para la fabricación de productos alimenticios y farmacéuticos
 - Plantas para el tratamiento de aguas
 - Plantas químicas y petroquímicas
 - Componentes para motores de automotores y aeronaves
 - Tanques de combustibles y de productos químicos

1.2 Resumen histórico

Los primeros trabajos realizados para la fabricación de aceros inoxidables datan del siglo XIX. Ya en 1865, se producían, en pequeña cantidad, aceros con 25 a 35 % de níquel, que resistían bastante bien el aire y la humedad. En 1872, Wood y Clark, produjeron aceros con 5 % de cromo, los cuales mostraron mejores propiedades anticorrosivas que los aceros comunes. En 1892, Hadfield en Inglaterra, estudió las propiedades de ciertos aceros aleados con cromo, indicando que este mejoraba la resistencia a la corrosión. Entre 1904 y 1910, León Guillet y Portevin, en Francia, estudiaron aceros aleados con cromo y níquel, determinando microestructura y tratamientos térmicos en unos cuantos de ellos.

El real descubrimiento se produjo en vísperas de la primera guerra mundial. Su aparición industrial parece realizarse simultáneamente en varios países: en Inglaterra, Brearly en el año 1913 indicaba la buena resistencia a la corrosión de los aceros que contenían del 9 al 16% de cromo. En Alemania, Strauss y Maurer en el año 1914 indican las propiedades de resistencia a la herrumbre y a los ácidos, de aceros que contenían una cantidad considerable de cromo y níquel, patentando dos grupos de aceros cromo-níquel inoxidables de bajo contenido de carbono. En U.S.A., Haynes menciona aceros con al menos 10 % de cromo y 5 % de cobalto. En Francia, fue en 1917 cuando se patentaron los aceros que contenían del 10 al 15 % de cromo y 20 al 40 % de níquel, como resultado de los trabajos realizados por P. Chevenard [6, 7, 8].

Tabla 1.1

Producción mundial de acero inoxidable de 2001 a 2007 en millones de toneladas [9]
(*) resultados parciales

Región	Año completo						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007 (*)
Europa Occidental y África	8,210	8,628	9,043	9,422	8,823	9,972	8,669
Europa Central y Oriental	0,285	0,279	0,322	0,318	0,310	0,363	0,364
América	2,289	2,735	2,830	2,933	2,688	2,951	2,604
Asia	8,403	9,048	10,645	11,897	12,498	15,074	16,200
Total mundial	19,187	20,690	22,840	24,570	24,319	28,359	27,836

Después de la segunda guerra mundial, y gracias a las innovaciones técnicas en el sector siderúrgico (horno eléctrico, colada continua, etc.), se consiguió un gran aumento de la producción

(ver Figura 1.1), con un abaratamiento de su costo y por lo tanto un precio más bajo en el mercado [9, 10, 11]. En la Tabla (1.1) pueden verse las estadísticas de producción de los últimos siete años.

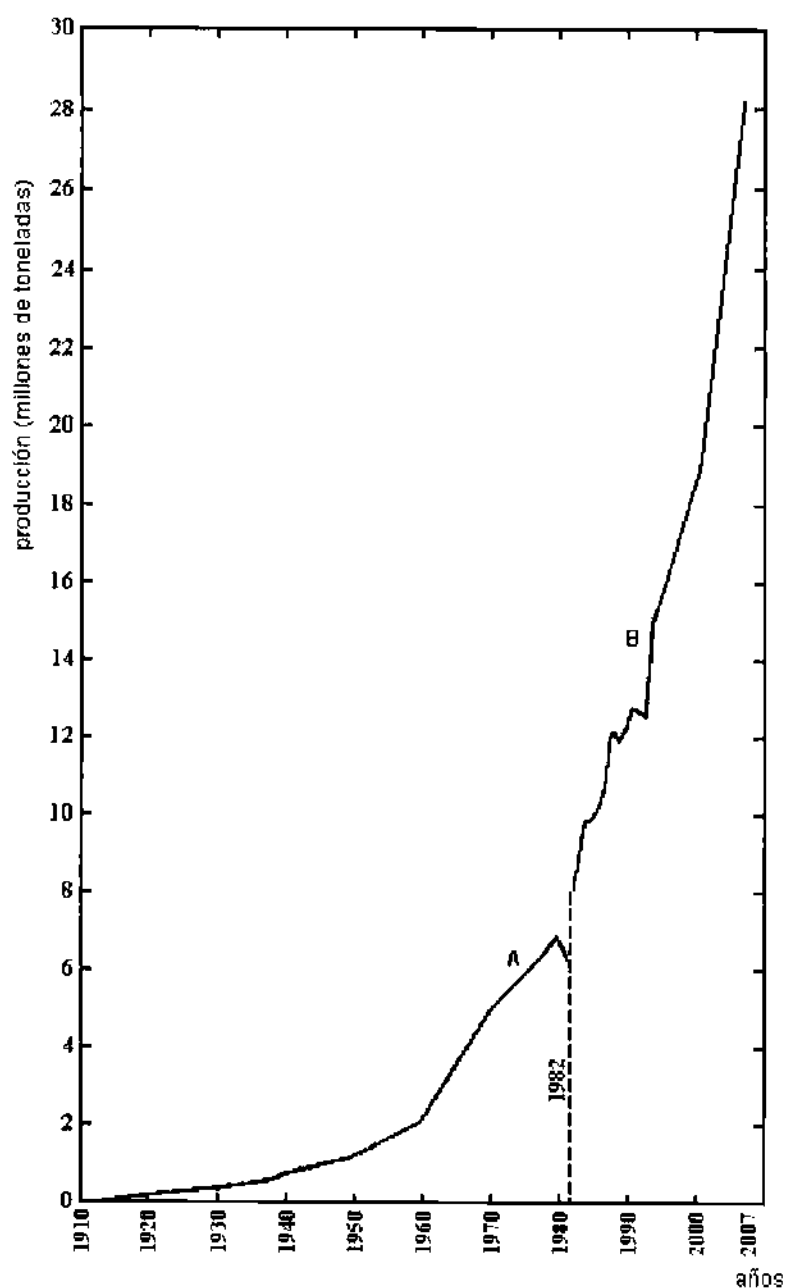


Figura 1.1

Evolución de la producción mundial de acero inoxidable.

A: Excluido URSS, China y Europa Oriental. B: Incluido URSS China y Europa Oriental
[9, 10]

1.3 Tipos y clasificación de los aceros inoxidables

Se han desarrollado aceros inoxidables para diferentes aplicaciones. Según el tipo y cantidad de aleantes que entran en su composición estos aceros pueden ser:

- **Martensíticos:** se desarrollaron para disponer de aceros resistentes a la corrosión, pero que fueran endurecibles por tratamiento térmico. Resisten sin oxidarse hasta los 750 °C y a veces aun más [3]. La dureza se logra por la formación de una fase (martensita), de gran dureza, mediante procesos de enfriamiento rápido. Estos aceros sólo contienen cromo (entre 12 y 16 %), no contienen níquel como metal de aleación. Contienen entre 0,1 y 0,4 % de carbono [4]. Estos aceros tienen, entre regular y buenas, propiedades de maquinado y soldado si se utilizan las técnicas apropiadas. La dureza y la resistencia a la erosión de estos aceros, les hace útiles como componentes de bombas, compresores, válvulas, turbinas hidráulicas, ejes y otros elementos de maquinaria [12].
- **Ferríticos:** es un grupo de aceros desarrollados para resistir la corrosión y la oxidación siendo particularmente resistentes a la corrosión bajo tensión. Son aceros magnéticos que no pueden ser endurecidos o aumentar su resistencia por tratamientos térmicos. Pueden ser trabajados en frío y ablandados por recocido. Como grupo son más resistentes a la corrosión que los aceros inoxidables martensíticos, pero menos que los aceros austeníticos. Tienen un excelente comportamiento a altas temperaturas, alcanzando los 850 °C con un contenido del 17 % de cromo, y 1050 °C con un 27 % de cromo [3]. En general tienen una resistencia mecánica bastante baja. Igual que los martensíticos son aceros con cromo (entre 16 y 30 % [4]), sin níquel. El contenido de cromo es mayor y el de carbono es menor que en los martensíticos. Se utilizan en componentes que estén en contacto con mezcla de ácidos nítrico y sulfúrico, y en la producción de nitrocelulosa [13].
- **Austeníticos:** son los más resistentes a la corrosión en general, poseen buenas propiedades mecánicas [13] y alta ductilidad, siendo la gama con más éxito en el ámbito comercial. Su composición incluye un 12-30 % de cromo y un 7-25 % de níquel y pequeños porcentajes de otros elementos [4]. Para esta última serie la composición química se modifica según el tipo de uso del material añadiendo o reduciendo elementos como el carbono y/o el nitrógeno y/o modificando el balance níquel /cromo [9]. No pueden ser templados y revenidos, ni recocidos en la forma ordinaria, debido a que en cualquier estado y a cualquier temperatura están constituidos por austenita, que tiene gran estabilidad y no se transforma por el enfriamiento rápido. Tienen buena resistencia mecánica a alta temperatura: el 18Cr-8Ni resiste sin oxidarse hasta 800 °C y otros aceros del mismo grupo con el agregado de 3 % de

1.3 Tipos y clasificación de los aceros inoxidables

Si resisten bien hasta 950 °C. El acero 25Cr-20Ni resiste sin oxidarse temperaturas de hasta 1150 °C [3]. Son utilizados en la industria alimentaria, industria cervecera y de bebidas gaseosas, industria química, arquitectura y aplicaciones que no involucren atmósferas o fluidos de alta corrosividad.

- **Dúplex:** son los de más reciente desarrollo; son aleaciones cromo-níquel-molibdeno que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita. Sus características son las siguientes: son magnéticos, no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, presentan buena soldabilidad, la estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión bajo tensión en ambientes de iones de cloruro [13]. Al costo de una mayor dificultad en el trabajado en caliente, alguno de estos aceros tienen el mérito de ser insensibles a la corrosión intergranular y son capaces de ser endurecidos por tratamiento térmico. Se emplean extensivamente en la industria papelera y de pasta celulósica en componentes y partes soldadas que no pueden ser tratadas térmicamente. En la industria petrolera, se utilizan por su alta resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión en ácido poliónico ($H_2 S_n O_6$) [12].
- **Endurecibles por precipitación:** se desarrollaron a escala industrial después de la Segunda Guerra Mundial, como una alternativa para elevar las características de resistencia mecánica mediante tratamientos térmicos de envejecimiento. Ofrecen una alternativa a los aceros inoxidables austeníticos cuando se desea asociar elevadas características mecánicas y de maquinabilidad [13], resistencia a la oxidación en caliente y buena aptitud para la soldadura. Tienen gran resistencia a los ácidos nítrico y sulfúrico y se emplean en bombas, válvulas, componentes bajo tensión en las industrias marina, química, textil, papelera, donde es esencial una la combinación de alta resistencia a la corrosión y resistencia mecánica [12].

1.4 Los aceros inoxidables austeníticos AISI 304

En la familia de los aceros inoxidables austeníticos se distinguen dos grupos: el de los austeníticos al cromo-níquel, por una parte y al cromo-manganeso-níquel por otra. El primer grupo es el más importante, dado que a él pertenecen la mayor parte de los aceros inoxidables comúnmente empleados, y está compuesto por aleaciones hierro-carbono-cromo-níquel con aporte ocasional de otros elementos, como el molibdeno, el titanio, el niobio, etc. Son los aceros, según la American Iron and Steel Institute (AISI), de la serie AISI 300, que tienen como composición básica 12% de cromo y 8% de níquel [13].

A partir de la familia AISI 304, y como muestra el esquema de la Figura 1.2, la modificación de la composición química tiene como objetivo conseguir determinadas propiedades mecánicas y químicas para ciertas aplicaciones. Si se toma al acero inoxidable austenítico 304 como punto de referencia, se añaden cromo y níquel para mejorar las características mecánicas y la resistencia a la oxidación. Sin embargo, para aumentar la resistencia a la corrosión intergranular hay varias vías: añadir niobio y tantalio o molibdeno disminuyendo el carbono. En este caso se trata de aceros tipo 304L, 316L y 317L. Añadir molibdeno sólo aumenta la resistencia a la corrosión localizada. El aumento del contenido de carbono sirve para mejorar las características mecánicas pero perjudica la resistencia a la corrosión. Por su parte, el azufre favorece la maquinabilidad pero disminuye la resistencia a la corrosión como consecuencia de la formación de sulfuros [10].

La presencia de elementos estabilizadores como el níquel, el manganeso, el carbono y el nitrógeno es necesaria en el caso de los aceros inoxidables austeníticos para bajar suficientemente la temperatura del intervalo gamma y evitar la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$. En las aleaciones forjadas, la ferrita formada durante la solidificación se transforma a austenita durante los procesos de forja y laminación posteriores. Con respecto a la transformación martensítica, el nitrógeno se considera un elemento estabilizador de la austenita. Sin embargo, se ha mostrado el efecto similar del nitrógeno y el carbono sobre la temperatura del inicio de la transformación martensítica. La adición de carbono (0.038-0.112%) y de nitrógeno (0.042-0.264%) aumenta la estabilidad de la austenita respecto a la martensita inducida por deformación [14].

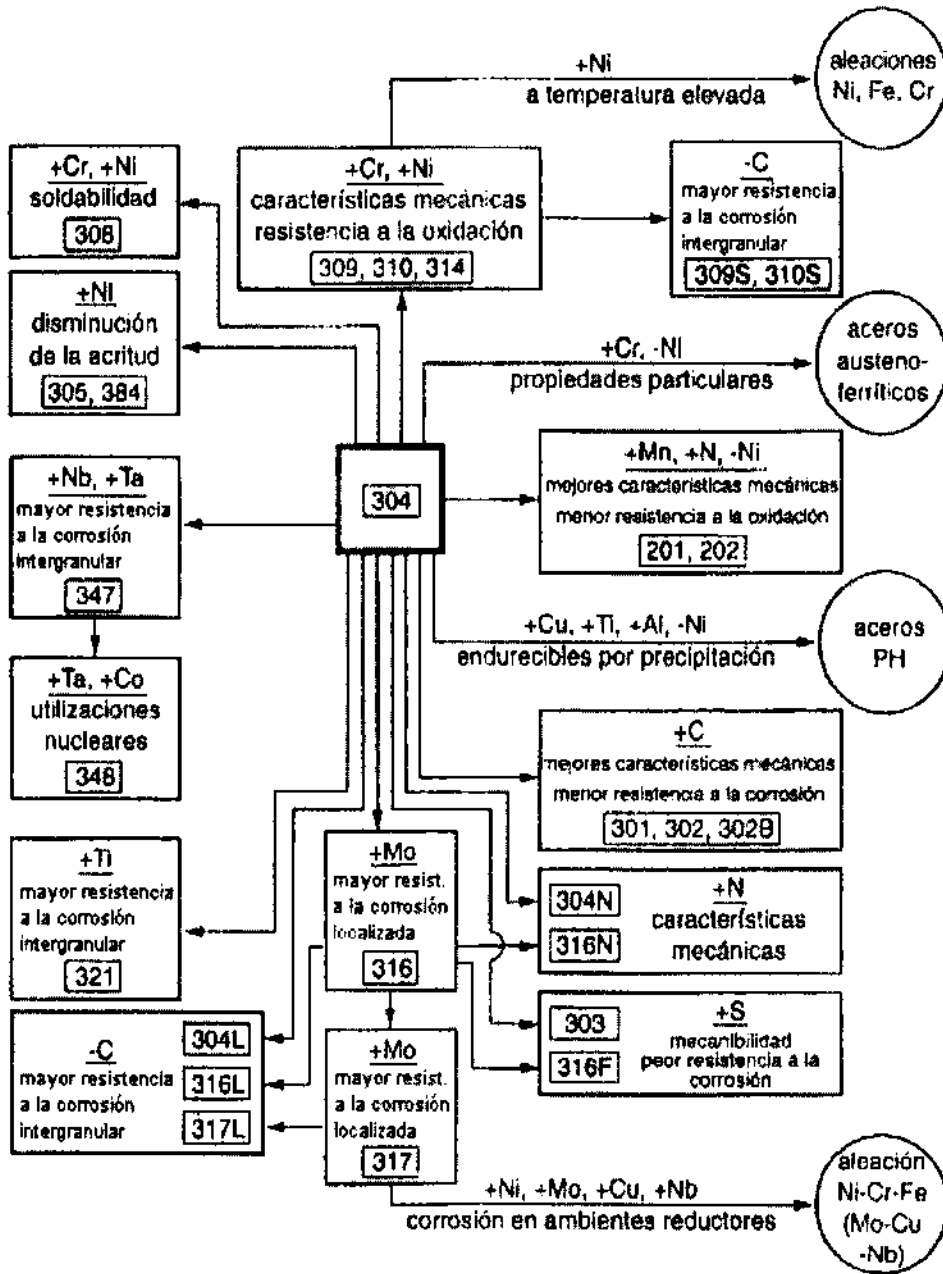


Figura 1.2

Familia de aceros inoxidable austeníticos evolucionados a partir del AISI 304, para la obtención de determinadas propiedades [11].

1.5 Transformación martensítica

Frecuentemente se observa, a causa de los procesos de fabricación de componentes de acero inoxidable austenítico, tales como embutido, trefilado, rectificado o bruñido, la transformación martensítica (transformación de la fase $\gamma \rightarrow \alpha'$) [2]. La aparición de martensita durante la deformación de un acero inoxidable austenítico trae aparejado un aumento en el coeficiente de endurecimiento por trabajado, lo cual afecta su facilidad de fabricación [15], pero, más importante aún, resulta perjudicial a sus propiedades de resistencia a la corrosión bajo tensión y a la resistencia a la fragilización por hidrógeno [2], y, en ciertos casos, empeora el problema de la sensibilización (corrosión debida a la precipitación de carburos de cromo) [16, 17]. Por otra parte, en ciertas aplicaciones, el aumento de las características mecánicas, debido a la aparición de martensita acicular, es aprovechado, por ejemplo, para la fabricación de resortes [18].

La martensita es el constituyente típico de los aceros templados, es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro, con una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (bct), una forma distorsionada de la cúbica centrada en el cuerpo (bcc) del hierro α [19].

La transformación martensítica ocurre tanto en aleaciones ferrosas como no ferrosas, y tiene las siguientes características:

1. La transformación ocurre sin cambio en la composición: un átomo individual no se mueve más de una distancia atómica. Esto implica que la transformación es sin difusión [19].
2. La transformación se realiza mediante una deformación de corte en un volumen discreto de material. Para una dada composición existe una definida y constante relación de orientación entre las fases austenita y martensita. Esta deformación homogénea deja una interfase aproximadamente invariante, sin rotación ni distorsión, llamado plano de hábito [19].
3. La interfase martensita-matriz es de deslizamiento. Esto es consistente con el hecho de que estén involucradas deformaciones de corte. La interfase se puede mover a gran velocidad en un amplio rango de temperaturas [19].

Se pueden distinguir dos temperaturas de transformación martensítica de la austenita inestable, correspondientes a los procesos con los que se produce:

1. La primera, M_s , corresponde a la aparición de martensita de origen térmico [20];
2. La segunda, M_d , caracteriza la posibilidad de la formación de martensita bajo el efecto de una deformación plástica [21].

La transformación martensítica en aceros inoxidables austeníticos, normalmente, se presenta sólo por enfriamiento brusco hasta temperaturas por debajo de la temperatura ambiente o por deformación debajo de la temperatura M_d . En aceros austeníticos del tipo 18/8, la transformación

martensítica ($\gamma \rightarrow \alpha'$) es complicada por la presencia de la fase ϵ (hcp), la cual, a menudo, se encuentra estrechamente relacionada con la fase α' [22, 23].

1.5.1 Transformación martensítica por enfriamiento a baja temperatura.

Por enfriamiento rápido desde 1050-1100 °C, la transformación de la austenita γ en martensita α' comienza a partir de la temperatura M_s . Independiente de la difusión sobre el plano cinético, esta transformación se manifiesta por la aparición brutal de la martensita α' formada según un mecanismo de corte que implica la existencia de relaciones específicas de orientación entre la nueva fase α' y la fase madre γ [21]. Observaciones experimentales de la relación de orientación entre austenita y martensita muestran que los planos $\{111\}_\gamma$ son aproximadamente paralelos a los planos $\{110\}_{\alpha'}$ [20].

Todos los elementos en solución sólida dentro de la austenita disminuyen la temperatura M_s [19, 21]. Varias fórmulas empíricas ilustran el efecto de la composición química (porcentajes en peso) sobre la temperatura M_s , particularmente la siguiente [21, 24]:

$$M_s(^{\circ}\text{C}) = 502 - 810(\%C) - 1230(\%N) - 13(\%Mn) - 30(\%Ni) - 12(\%Cr) - 54(\%Cu) - 6(\%Mo)$$

A modo de ejemplo, se calculó la temperatura M_s para tres tipos de aceros inoxidable austeníticos: AISI 347, 304 y 316 (los empleados en este trabajo). Los resultados se hallan en la Tabla 1.2. En esta tabla la primera columna corresponde a la designación del acero, las columnas 2 a 7 a los porcentajes en peso de los elementos de la aleación necesarios para el cálculo de M_s [25] y la última columna a los resultados obtenidos.

Tabla 1.2

Temperatura M_s para tres tipos de aceros inoxidable austeníticos: AISI 347, 304 y 316, calculada a partir de su composición.

AISI	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	M_s [°C]
347	0,05	1,48	0,44	9,88	17,52	0,36	-67
304	0,07	1,17	0,43	9,86	18,46	0,6	-91
316	0,05	1,04	0,6	11,48	16,16	2,08	-103

Como ejemplo, la Figura 1.3 muestra la evolución de la temperatura M_s de un acero inoxidable austenítico al 18% Cr en función del contenido de níquel. Entre los aceros inoxidable austeníticos menos aleados, la transformación parcial de la austenita en martensita puede ocurrir a temperatura ambiente si la M_s es superior a aquella. Para los aceros inoxidable austeníticos más aleados, en consecuencia, más estables, la temperatura M_s es claramente inferior a la temperatura

1.5 Transformación martensítica

ambiente (ver Tabla 1.2); la transformación martensítica se obtiene entonces por enfriamientos bruscos hasta temperaturas por debajo de los 0°C . La tasa de la transformación es función de la temperatura alcanzada [21].

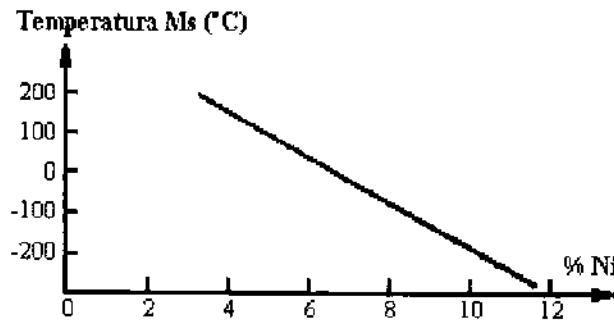


Figura 1.3
Evolución de la temperatura M_s de un acero 18% Cr- 0,04% C
en función del contenido de níquel [21].

La morfología y cristalografía de la martensita obtenida por templado, depende de la composición, habiéndose observado cinco tipos de productos de la transformación. Cuatro de estos productos se denominaron martensita de listones, de placas, superficial, y masiva, mientras que el quinto ha sido llamado fase ϵ . En la martensita de listones, cada cristal individual puede describirse geométricamente como aguja. En la martensita de placas, las placas son, usualmente, cristales simples. La martensita superficial se forma en un rango muy limitado de composición (5 a 10% Cr, 15 a 25% Ni) en el sistema ternario Fe-Cr-Ni, confinada casi exclusivamente a la superficie ($<0,1$ mm de profundidad). La martensita masiva se ha encontrado para rangos de composición del 10 al 25 % Ni, conteniendo, además, por lo menos un 16% Cr; consiste de una serie de plaquetas de forma muy irregular [22].

1.5.2 Transformación martensítica por deformación.

Bajo el efecto de la deformación en frío, la austenita puede transformarse en martensita α' encima de la temperatura M_s . La temperatura M_d ($M_d > M_s$) es aquella definida como la temperatura por encima de la cual no se produce transformación martensítica, cualquiera sea la deformación [21].

La transformación martensítica se observa frecuentemente en el transcurso de los procesos de fabricación de componentes de acero inoxidable austenítico, tales como embutido, trefilado, rectificado o bruñido.

1.5 Transformación martensítica

La cantidad de martensita formada es función a la vez de la composición química del acero inoxidable austenítico, del modo, de la tasa y de la velocidad de deformación y, naturalmente, de la temperatura [21, 22, 23]. La Figura 1.4 indica la tasa de la transformación martensítica en función de la elongación verdadera de un acero inoxidable austenítico del tipo 18-8, a diferentes temperaturas de trabajado. Se observa que la transformación nunca es completa por sola deformación y que se produce un efecto de saturación en un valor menor que el 100% de martensita. Este efecto de estabilización de la austenita se debe a un incremento en la energía superficial de la martensita, tal que, finalmente, supera los efectos de la tensión aplicada externamente [23].

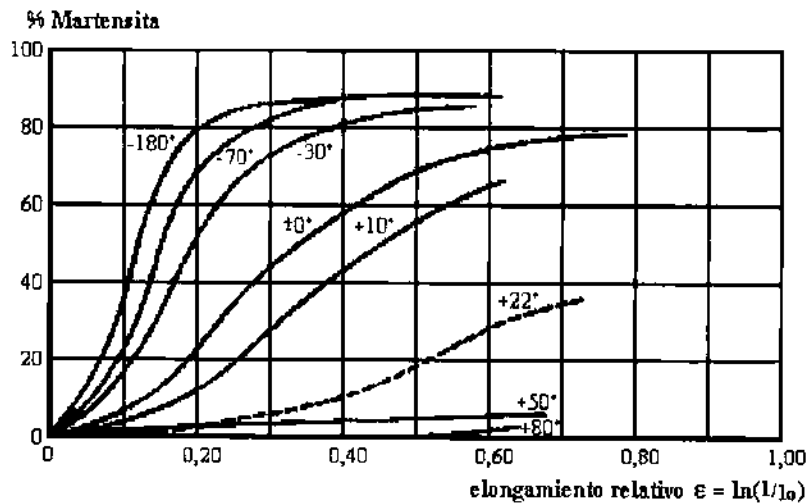


Figura 1.4

Formación, a diferentes temperaturas, de martensita dentro de un acero inoxidable austenítico del tipo 18-8 en función de la elongación relativa [21].

A temperatura ambiente, la influencia de la composición química de la aleación sobre la transformación martensítica se ilustra por la Figura 1.5, que representa la variación del contenido de martensita magnética α' en función de la tasa de reducción (por laminación en frío) para aceros inoxidables austeníticos de los tipos 18-8, 18-12 y 18-12-Ti. Se observa como para mayores porcentajes de níquel, se obtienen menores proporciones de martensita.

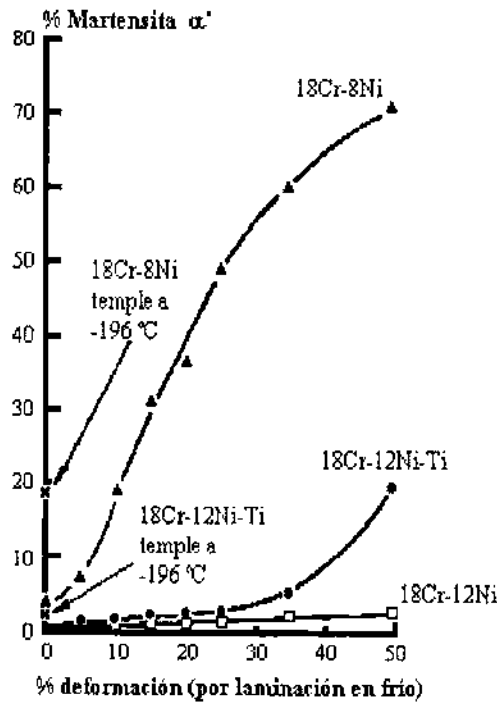


Figura 1.5

Efectos de la tasa de deformación en frío (a temperatura ambiente) y del temple (a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) sobre la tasa de formación de martensita α' [21].

Se observa en la Figura 1.6 que la temperatura M_d es algo ambigua. Para elongaciones muy grandes la aparición de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha'$ es abrupta. Para estiramientos pequeños, la temperatura M_d es difícil de determinar. Por esta razón, su expresión fue definida para una deformación del 30%, denominándose M_{d30} [23].

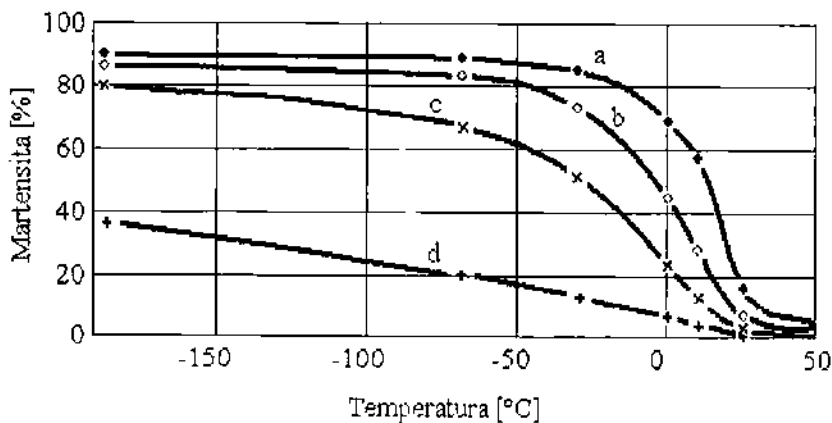


Figura 1.6

Proporción de martensita formada en función de la temperatura para deformaciones de: (a) 50%, (b) 30%, (c) 20%, (d) 10% [28].

El efecto de los elementos de aleación (porcentajes en peso), entonces, se pone en evidencia por la fórmula:

$$M_{d30}(^{\circ}\text{C}) = 497 - 462(\%C + \%N) - 9,2(\%Si) - 8,1(\%Mn) - 13,7(\%Cr) - 20(\%Ni) - 18,5(\%Mo)$$

donde M_{d30} es la temperatura a la cual el 50% de martensita se forma bajo el efecto de una deformación verdadera del 30% [21, 24, 26, 27]. La estabilización por el titanio ejerce un efecto contrario por reducción del carbono y del nitrógeno en solución sólida.

A modo de ejemplo, se calculó la temperatura M_{d30} para tres tipos de aceros inoxidable austeníticos: AISI 347, 304 y 316 (los empleados en este trabajo). Los resultados pueden verse en la Tabla 1.3. En esta tabla la primer columna corresponde a la designación del acero, las columnas 2 a 7 a los porcentajes en peso de los elementos de la aleación necesarios para el cálculo de M_{d30} [25] y la última columna a los resultados obtenidos. A partir de estos, se puede apreciar la mayor estabilidad de la austenita en el acero AISI 316.

Tabla 1.3

Temperatura M_{d30} para tres tipos de aceros inoxidable austeníticos: AISI 347, 304 y 316, calculada a partir de su composición.

AISI	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	M_{d30} [°C]
347	0,05	1,48	0,44	9,88	17,52	0,36	14
304	0,07	1,17	0,43	9,86	18,46	0,6	-10
316	0,05	1,04	0,6	11,48	16,16	2,08	-30

En la Tabla 1.4 se encuentran los valores de M_{d30} para los contenidos de aleantes máximos y mínimos permitidos según lo establecido por la AISI para los mismos tipos de aceros [28]. Las composiciones que da AISI son los límites mínimos y máximos (o sólo los máximos en el caso de algunos elementos) para cada tipo de acero. En los casos en que sólo se indican % máximos, el criterio aplicado fue fijar el % mínimo en 0,03 [29]. Por ejemplo, si el %C fuese menor a 0,03 el acero sería L (low carbon) y no un grado AISI 304 ó 316 común. Se aprecia que, como consecuencia de los límites que fija la norma, estos aceros tienen un rango M_{d30} de más de 120 °C, llegando a ser susceptibles de la transformación martensítica por deformación a temperatura ambiente, cuando sus composiciones están en el límite inferior de estos aleantes. Se comprueba también la mayor estabilidad de la fase austenita en el tipo de acero AISI 316

Tabla 1.4

Temperatura M_{d30} para tres tipos de aceros inoxidable austeníticos: AISI 347, 304 y 316, calculada para los contenidos de aleantes máximos y mínimos permitidos según lo establecido por la AISI.

AISI	%	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	M_{d30} [°C]
347	mín.	0,03	0,03	0,03	9	17	0	70
	máx.	0,08	2	1	13	19	0	-86
304	mín.	0,03	0,03	0,03	8	18	0	76
	máx.	0,08	2	1	10,5	20	0	-49
316	mín.	0,03	0,03	0,03	10	16	2	26
	máx.	0,08	2	1	14	18	3	-147

Estudios cristalográficos han puesto en evidencia la presencia de martensita ϵ , de estructura hexagonal compacta, al lado de la martensita α' cúbica centrada. La martensita ϵ , no magnética, es difícil de detectar por microscopía óptica [21, 30], su identificación requiere técnicas de difracción [23]. La martensita ϵ se forma dentro de los aceros inoxidable austeníticos con baja energía de falla de apilamiento. La martensita ϵ se obtiene por:

1. temple a -196 °C
2. temple o deformación a temperatura ambiente

si la energía de falla de apilamiento es respectivamente inferior a 43 y 30 mJ/m² [21].

Ninguna relación liga la $M_s(\epsilon)$ o la $M_d(\epsilon)$ con la composición química del acero inoxidable austenítico. Como con la martensita α' , la formación de martensita ϵ es independiente de la difusión, los cristales de esta fase se cruzan según ciertas direcciones privilegiadas de la fase inicial [21].

Las martensitas ϵ y α' son meta estables y la transformación inversa en austenita se produce por calentamiento con una histéresis importante. La reversión de la martensita ϵ en austenita tiene lugar entre los 150 y 400 °C, mientras que aquella de la martensita α' , sucede entre los 400 y 800 °C (Figura 1.7) [21]. En la Figura 1.7 se puede apreciar que la proporción de austenita recuperada que se obtiene por intermedio de un tratamiento térmico es función de la temperatura a la cual se realiza dicho tratamiento. Si la temperatura del tratamiento térmico es lo suficientemente alta la proporción de austenita recuperada es de casi el 100%.

El aumento del contenido de martensita α' , observado en la Figura 1.7, después de mantener 20 h a 400 °C, es la consecuencia de la precipitación de carburos durante el recocido y de la elevación concomitante del punto M_s , [21].

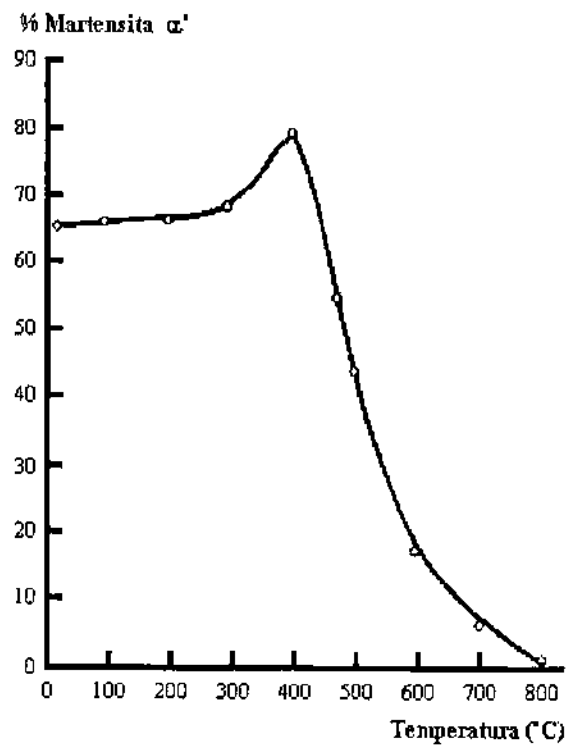


Figura 1.7

Reversión de la martensita α' en austenita, después de un recocido de 20 h, para un acero del tipo 18-8 que ha sufrido una reducción en frío del 50% [21].

1.6 Aparición de ferrita en soldaduras

Aunque los aceros inoxidable austeníticos son predominantemente austeníticos, a menudo contienen pequeñas cantidades de ferrita (bcc), especialmente en las soldaduras. Esta ferrita, que se forma a temperaturas elevadas, se denomina ferrita δ y se distingue de la ferrita α que es la fase estable a baja temperatura en aleaciones de base hierro (no austeníticas). Dependiendo de la composición de aleación y como resultado de la soldadura, estos aceros pueden solidificar con una microestructura con ferrita δ retenida a temperatura ambiente.

En esta clase de aleaciones, la soldabilidad y el comportamiento del material son complejos y están, en general, directamente relacionados con la microestructura de la soldadura. Por lo tanto, durante la soldadura de estas aleaciones, un conocimiento general de la metalurgia de ésta resulta beneficiosa para optimizar el rendimiento de la misma.

Una de las principales cuestiones a tener en cuenta al soldar aceros inoxidable austeníticos, es su susceptibilidad a la fisuración durante la solidificación. Sin embargo, estos materiales pueden ser muy resistentes a esta fisuración en caliente, si su composición está equilibrada, de tal manera de garantizar que la soldadura del metal contiene más de 3 % en volumen de ferrita.

Por otra parte, hay casos en que son necesarias soldaduras totalmente austeníticas (sin contenido de ferrita δ), por ejemplo cuando la soldadura debe ser no magnética, o cuando permanecerá en ambientes corrosivos que atacan selectivamente la fase de ferrita. En estos casos, la susceptibilidad a la fisuración en caliente puede aumentar, por lo cual se debe soldar en condiciones especiales.

El contenido de ferrita en el metal soldado puede ser predicho usando diagramas constitutivos, o puede medirse a través de instrumentos que utilizan las características ferromagnéticas de la fase ferrita.

Hay algunos instrumentos comerciales para la determinación del contenido de ferrita en soldaduras, tales como el Magnagage, Severn Gage, y los ferrideltímetros. El Severn Gage y los ferrideltímetros son particularmente aplicables para su uso en campo o en planta de producción. El ferrideltímetro es también útil en la medición de la ferrita en soldaduras de pequeña sección, como ocurre a menudo con soldadura por haz de electrones. Estos procedimientos requieren de la utilización de patrones, tales como los que ofrece el National Institute of Standards and Technology (NIST) o patrones certificados de los niveles de ferrita en el metal soldado [14, 23, 31, 32, 33].

1.7 Materiales magnéticos

Los materiales magnéticos están clasificados en dos grupos, con la característica magnética de duros o blandos. Los materiales magnéticos duros se caracterizan por el mantenimiento de una gran cantidad de magnetismo remanente, después de la exposición a campos magnéticos fuertes. Estos materiales normalmente tienen altos valores de fuerza coercitiva H_c (ver Figura 1.8), y se utilizan como imanes permanentes. La fuerza coercitiva es una medida de la fuerza de magnetización necesaria para reducir la inducción magnética a cero después de que el material se ha magnetizado. En cambio, los materiales magnéticos blandos son magnetizados por, relativamente, bajas intensidades de campo magnético, alcanzando altos valores de inducción magnética de saturación B_s (ver Figura 1.8), y cuando el campo aplicado es eliminado, y vuelven a un estado de, relativamente, bajo magnetismo remanente [34]. Se caracterizan también por sus bajas pérdidas por histéresis y su alta permeabilidad magnética relativa (ver Figura 1.9), la cual se mide en el codo de la curva de magnetización, justo antes que comience la saturación. Se utilizan en máquinas y dispositivos eléctricos, como ser: bobinas, relés, motores, generadores, transformadores, etc.

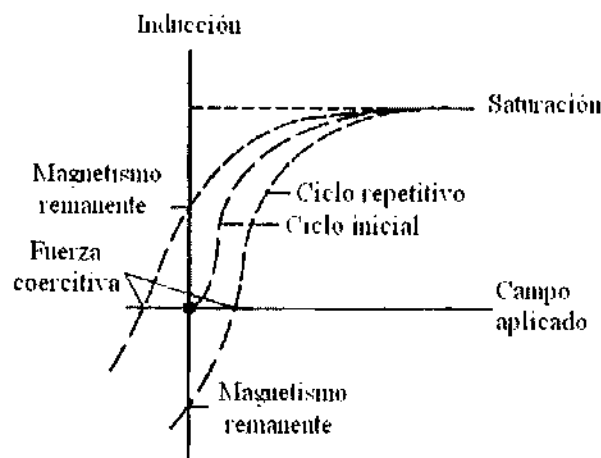


Figura 1.8
Lazo de histéresis de un material ferromagnético [35].

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por la presencia de lazos de histéresis. En los denominados materiales magnéticos blandos, los bucles son muy estrechos; en los materiales magnéticos duros, los bucles pueden ser muy amplios (ver Figura 1.10) [36, 37]. Algunos materiales magnéticamente blandos son: el hierro de alta pureza, el acero de bajo contenido de carbono, aleaciones Fe-Si, aleaciones Fe-Ni, aleaciones Fe-Co, ferritos [34], aceros inoxidables ferríticos [35], y aceros inoxidables austeníticos que hayan sido trabajados en frío [38].

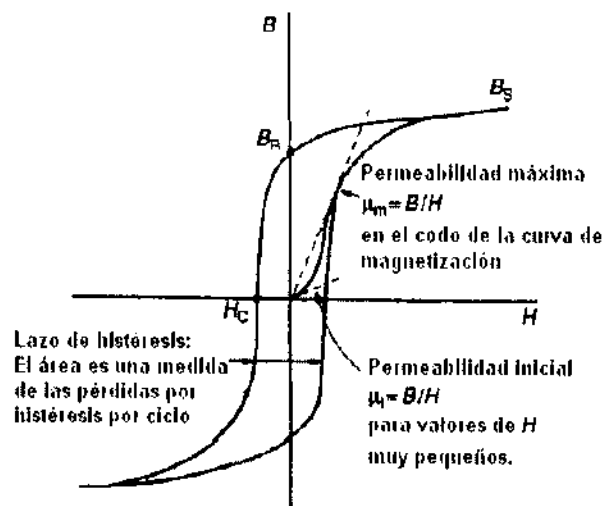


Figura 1.9
Lazo de histéresis de un material ferromagnético [36].

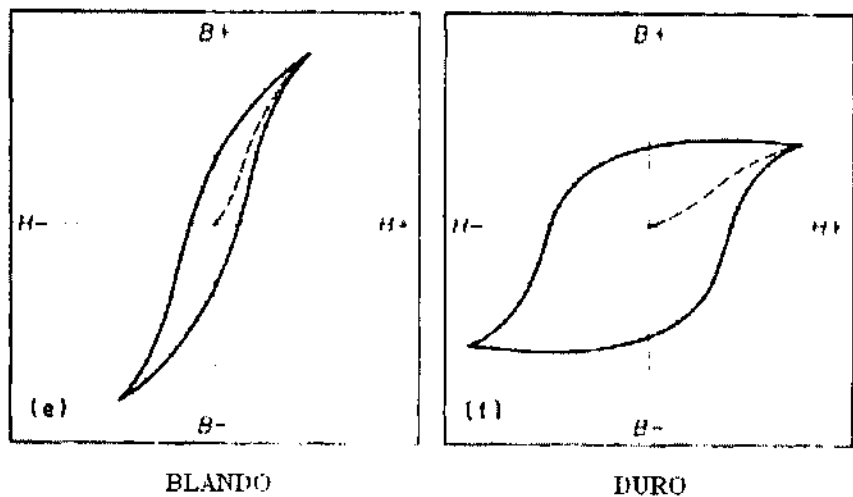


Figura 1.10
Esquema que visualiza la diferencia entre los lazos de histéresis de materiales magnéticos blandos y duros [39].

CAPITULO II

Desarrollo del modelo matemático

2.1 Introducción

El método de ensayo por corrientes inducidas permite, entre otras cosas, evaluar en forma no destructiva la integridad de piezas de materiales conductores de la electricidad, así como sus propiedades electromagnéticas [40, 41]. Ya en 1879, Hughes detectó variaciones de conductividad eléctrica, permeabilidad magnética y temperatura en metales con este método, aunque su uso como ensayo recién se implementó a partir de 1935 [42].

Este método es una aplicación del principio de inducción electromagnética de Faraday, cuyo esquema puede verse en la Figura 2.1.

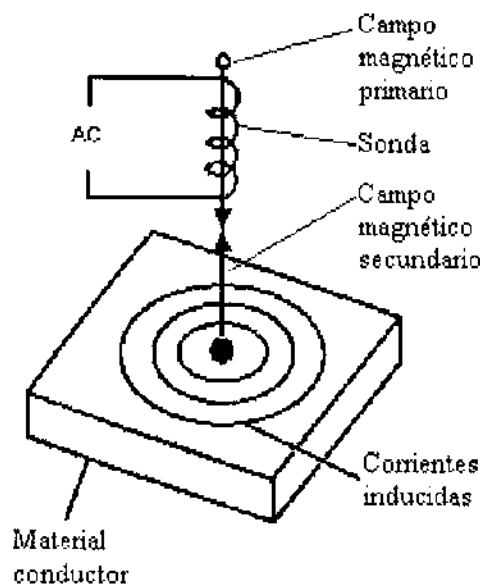


Figura 2.1

Representación esquemática de un ensayo no destructivo de corrientes inducidas

La generación del campo electromagnético y la detección de sus variaciones se realiza por medio de bobinas por las que circula una corriente eléctrica alterna, usualmente con frecuencias de entre 100 Hz y 10 MHz.

Para entender los principios y características básicos de un ensayo no destructivo de corrientes inducidas (END CI), se utilizará una analogía entre un modelo simplificado de un circuito real de un END CI (Figura 2.1) y el circuito de funcionamiento del transformador eléctrico [43] (Figura 2.2). En este circuito, la inductancia del primario del transformador L_1 , representa la

auto inductancia de la sonda de corrientes inducidas y R_1 la resistencia eléctrica de la misma. L_2 (inductancia secundaria) y R_2 (resistencia de carga) representan a la probeta ensayada, y m es el factor de acoplamiento magnético entre la sonda y la probeta

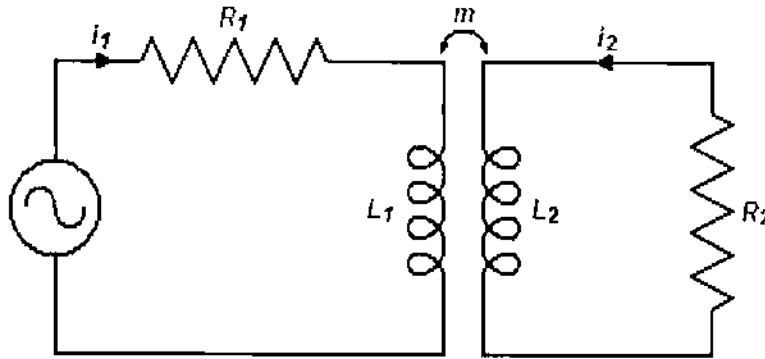


Figura 2.2
Circuito equivalente de un transformador eléctrico

En esta analogía la sonda del equipo de corrientes inducidas constituye la impedancia primaria del transformador, mientras que la pieza ensayada representa el secundario del mismo. Ambos circuitos, primario y secundario, se encuentran acoplados magnéticamente. El objeto ensayado es considerado generalmente como una placa metálica homogénea. Básicamente el modelo supone que la placa es semi-infinita, de modo que no haya líneas de fuerza del campo magnético que lo atraviesen por completo [44].

En un transformador eléctrico la corriente eléctrica i_1 que circula por la bobina primaria genera un campo magnético, el cual induce una tensión eléctrica en la bobina secundaria. Cuando se aplica una carga en el secundario, comienza a circular una corriente eléctrica i_2 , ocasionando un cambio, en magnitud y fase, en la corriente del primario. En definitiva, la corriente del primario depende de los parámetros eléctricos del circuito secundario. Desde el circuito primario, el cambio de corriente se ve como un cambio en la impedancia de este circuito, la cual puede detectarse con el instrumental apropiado. Situándose ahora en el circuito correspondiente a un END CI, esta variación en la impedancia vista desde el circuito primario, depende de las propiedades electromagnéticas y de la geometría del objeto ensayado. Para modelizar este problema, debe realizarse un planteo en términos de las ecuaciones de Maxwell, tal como se realiza en la sección siguiente.

2.2 *Desarrollo del modelo analítico*

Los problemas relacionados con corrientes inducidas corresponden al rango de frecuencias intermedias, rango en el que muy pocos problemas habían sido resueltos hacia el año 1965, cuando partiendo de las ecuaciones de Maxwell, Cheng propone una solución analítica al problema de los ensayos con corrientes inducidas para configuraciones axisimétricas y dentro de la aproximación de los regímenes cuasi-estacionarios (ARCS) [45].

Las ecuaciones diferenciales para el potencial vectorial, usado en este modelo, pueden deducirse de las ecuaciones de Maxwell, suponiendo simetría axial. La solución general a estas ecuaciones se obtiene en este modelo con las hipótesis de corriente senoidal y medio lineal, isótropo, homogéneo y con conductividad eléctrica y permeabilidad magnética constantes. Esta solución está dada en términos de integrales de funciones de Bessel.

Con el potencial vectorial así determinado se calculan, entonces, la densidad y la distribución de las corrientes inducidas en el material, la tensión inducida y la impedancia de la bobina sensora.

2.3 De las ecuaciones de Maxwell a la ecuación del potencial vectorial

El problema considerado por Cheng [45] (Figura 2.3) fue calcular el potencial vectorial producido en todo punto del espacio por una espira de corriente elemental (o puntual), denominada por otros autores [46] “delta function coil”. Esta “delta function coil” es de hecho una función de Dirac implícita bidimensional. La configuración resulta ser axisimétrica. El espacio se constituye de un apilamiento de capas con diferentes propiedades. Las regiones I y II corresponden a las zonas de aire situadas por encima y por debajo de la espira respectivamente, la región III está constituida por una placa semi-infinita de material con conductividad eléctrica σ y permeabilidad magnética μ , como se muestra en la Figura 2.3. Además, se supone que $\rho = 0$, dada la ausencia de fenómenos capacitivos.

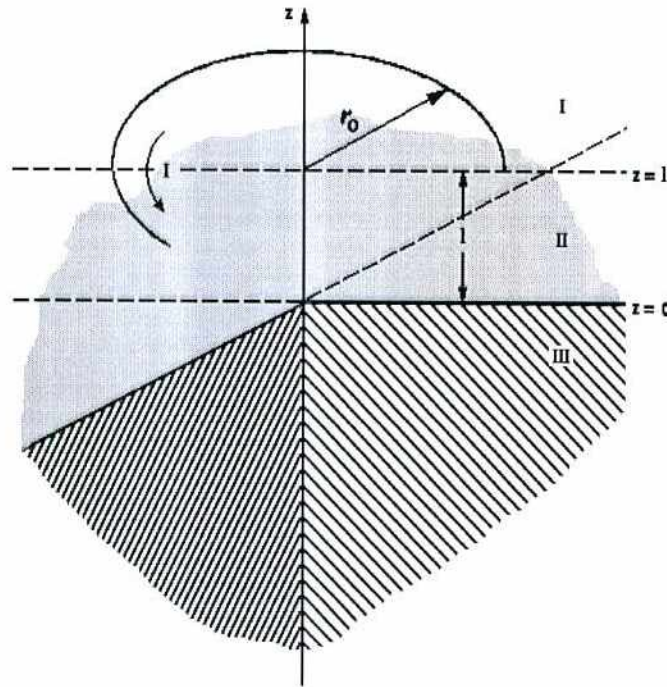


Figura 2.3

Espira de corriente elemental sobre un material conductor plano seminfinito.

Se investiga la solución a este problema a partir de la resolución de las ecuaciones de Maxwell formuladas en términos de potenciales vectoriales y escalares [47].

Las ecuaciones de Maxwell dependientes del tiempo se pueden escribir en forma diferencial [48], de la siguiente manera:

$$(1) \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

Ecuación de Maxwell-Gauss

2.3 De las ecuaciones de Maxwell a la ecuación del potencial vectorial

donde $\mathbf{D}$ es el desplazamiento eléctrico, y ρ la densidad volumétrica de cargas eléctricas,

$$(2) \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \quad \text{Ecuación de Maxwell-Faraday-Henry}$$

donde $\mathbf{E}$ es el campo eléctrico y $\mathbf{B}$ es la inducción magnética, que también cumple

$$(3) \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Ecuación de conservación de flujo magnético}$$

$$(4) \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Ecuación de Maxwell-Ampère}$$

donde $\mathbf{H}$ es el campo magnético y $\mathbf{J}$ representa la densidad de corriente existente en cada región (de fuente y/o de inducción), así:

$$\mathbf{J} = \begin{cases} \mathbf{i}_0 & ; z = l \\ \sigma \mathbf{E} & ; z \leq 0 \\ 0 & ; z > 0 \wedge z \neq l \end{cases}$$

A estas ecuaciones sobre los campos y las corrientes, se añaden las relaciones constitutivas de la materia que permiten deducir la inducción de campo. Dentro del marco de nuestro estudio los medios considerados son lineales, homogéneos e isótropos; tenemos por consiguiente:

$$(5) \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$(6) \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

donde ϵ y μ son respectivamente la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del medio.

La ecuación (3) de conservación de flujo y uno de los teoremas del análisis vectorial [49] nos permiten escribir:

$$(7) \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad \text{Ecuación que introduce el potencial vectorial } A$$

Este campo vectorial $\mathbf{A}$ no es único, y se puede usar igualmente $\mathbf{A}' = \mathbf{A} + \nabla f$ para cualquier función $f(t, x, y, z)$, pues $\nabla \times \nabla f = 0$ (esta libertad en la selección se llama libertad de medida ("gauge")) [49]. Para cualquier selección de $\mathbf{A}$, la ecuación de Maxwell-Faraday (2) puede entonces ser escrita:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{A}),$$

o de nuevo:

2.3 De las ecuaciones de Maxwell a la ecuación del potencial vectorial

$$(8) \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla \times \mathbf{E} + (\nabla \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) = \nabla \times (\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) = 0$$

ya que los operadores de derivación temporal y espacial conmutan (independencia del tiempo y del espacio dentro de un marco no relativista).

La ecuación (8) y otro de los teoremas del análisis vectorial [49] nos permite escribir luego:

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla V$$

o sea:

$$(9) \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V$$

Por lo tanto, la densidad de corriente en el material conductor bajo estudio (región III en la Figura 2.3), puede ser escrita como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \quad ; \quad z \leq 0$$

Con esta nueva notación, la ecuación de Maxwell-Ampère (4) se reduce entonces (con (5), (6), (7) y (9)):

(10)

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \mathbf{B} \right) - \frac{\partial (\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) \right) - \epsilon \frac{\partial \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \right)}{\partial t} = \mathbf{j}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right)$$

Ahora se aprovechará la libertad que se tiene para escoger $\mathbf{A}$. Si se impone la “condición”

$$\frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t} = \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V,$$

donde $\mathbf{A}^*$ es un potencial escalar modificado que verifica, dada la ausencia de fenómenos capacitivos ($\rho = 0$), la medida de Coulomb: $\nabla \cdot \mathbf{A}^* = 0$,

quedando la ecuación (9):
$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V$$

y por consiguiente:
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla V \right),$$

2.3 De las ecuaciones de Maxwell a la ecuación del potencial vectorial

pero también:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}^*$$

ya que, por la independencia de las componentes espaciales y temporales y recordando que el rotacional de un gradiente es nulo:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \times \left(\mathbf{A}^* - \int \nabla V dt \right) = \nabla \times \mathbf{A}^* - \nabla \times \left(\int \nabla V dt \right) = \nabla \times \mathbf{A}^* - \int \nabla \times \nabla V dt = \nabla \times \mathbf{A}^*$$

La ecuación (10) se escribe entonces:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}^*) \right) + \varepsilon \frac{\partial \left(\frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t} \right)}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}^*) + \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \mathbf{A}^*) + \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}^*}{\partial t^2} = \mathbf{i}_0 - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t}.$$

de donde, finalmente, multiplicando esta ecuación por μ :

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}^*) + \mu \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \mathbf{A}^*) + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}^*}{\partial t^2} = \mu \mathbf{i}_0 - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}^*}{\partial t}$$

Para mayor simplicidad, se reemplaza a continuación $\mathbf{A}^*$ por $\mathbf{A}$, recordando sin embargo que se trata de un potencial vectorial modificado.

Utilizando la identidad:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

(obtenida del análisis vectorial [49]), y teniendo en cuenta que en régimen cuasi-estacionario, y en ausencia de fenómenos capacitivos, $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ (regla de Coulomb verificada por el potencial vectorial modificado), hacemos:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = -\nabla^2 \mathbf{A}$$

Obtenemos entonces la ecuación diferencial verificada por el potencial vectorial modificado $\mathbf{A}$:

$$(11) \quad \boxed{\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{i}_0 + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \mu \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \mathbf{A})} \quad \text{Ecuación sobre } \mathbf{A} \text{ con } \mathbf{i}_0 = 0 \text{ en}$$

todo el dominio, excepto sobre la espira.

2.4 Solución de la ecuación del potencial vectorial

Si la simetría del problema es axial, como muestra la Figura 2.3, el potencial vectorial será también simétrico respecto del eje de la bobina. Dado que existe solamente la componente θ de I (ver Figura 2.3), existirá sólo la componente θ de A , y su ecuación, entonces, se reduce a:

$$(12) \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = -\mu i_0 + \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - \mu \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r A}{\partial r} \right) + \frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right]$$

donde $A = A_\theta$ y $A_r = A_z = 0$

Si i_0 es una función senoidal del tiempo, el potencial vectorial también lo será.

$$i_0 \rightarrow i_0 e^{j\omega t} \Rightarrow A \rightarrow A e^{j\omega t}$$

quedando la ecuación de esta manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} e^{j\omega t} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} e^{j\omega t} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} e^{j\omega t} - \frac{A}{r^2} e^{j\omega t} = \\ = -\mu i_0 e^{j\omega t} + j\omega \mu \sigma A e^{j\omega t} - \omega^2 \mu \epsilon A e^{j\omega t} - \mu \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r A}{\partial r} e^{j\omega t} \right) + \frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} e^{j\omega t} \right] \end{aligned}$$

Después de cancelar $e^{j\omega t}$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = -\mu i_0 + j\omega \mu \sigma A - \omega^2 \mu \epsilon A - \mu \left[\frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r A}{\partial r} \right) + \frac{\partial \left(\frac{1}{\mu} \right)}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right]$$

Con la suposición de permeabilidad magnética constante en cada región, queda entonces:

$$(13) \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = -\mu i_0 + j\omega \mu \sigma A - \omega^2 \mu \epsilon A$$

2.4.1 Solución para el caso de una espira puntual ("delta-function coil") sobre un material plano semi-infinito

Se supone que el medio es lineal, isótropo y homogéneo. Cuando I es la corriente total circulante en una espira puntual a $(r_0; l)$, siendo r_0 el radio de la espira y l su distancia a la superficie de la muestra plana [46], la ecuación general se transforma en:

$$(14) \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} - j\omega\mu\alpha A + \omega^2\mu\epsilon A + \mu I \delta(r-r_0)\delta(z-l) = 0$$

La Figura 2.3 muestra la geometría (espira próxima a una muestra plana) para la cual se obtiene la solución particular de esta ecuación.

El problema se divide en tres regiones. La ecuación diferencial en aire (regiones I y II) [45] es

$$(15) \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} + k_0^2 A = -\mu I \delta(r-r_0)\delta(z-l), \quad \text{donde } k_0^2 = \omega^2\mu_0\epsilon_0$$

La ecuación diferencial en el conductor (región III) es

$$(16) \quad \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} + k_1^2 A = 0, \quad \text{donde } k_1^2 = \omega^2\mu_1\epsilon_1 - j\omega\mu_1\sigma$$

En la superficie del medio conductor plano, la continuidad de la componente tangencial de los campos eléctrico y magnético requiere que:

$$\left. \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A^{(II)}}{\partial z} \right|_{z=0^+} = \left. \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A^{(III)}}{\partial z} \right|_{z=0^-}$$

$$A^{(II)}(r, z)|_{z=0^+} = A^{(III)}(r, z)|_{z=0^-}$$

Las expresiones de la solución hallada por Cheng [45] de la ecuación diferencial del potencial vectorial, para el caso de una espira puntual sobre un cuerpo plano de material conductor, en cada región, resultan entonces:

(17)

$$A^{(I)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 I r_0 \left[\int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(z-l)} \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha + \int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(z+l)} \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha \right]$$

(18)

$$A^{(III)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 I r_0 \left[\int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(l-z)} \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha + \int_0^\infty J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(z+l)} \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha \right]$$

$$(19) \quad A^{(III)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu I r_0 \int_0^{\infty} J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{\alpha_1 z - \alpha_0 l} \left(\frac{2\mu_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha$$

donde $\alpha_0 = \sqrt{\alpha^2 - k_0^2}$, $\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 - k_1^2}$ y J_l es la función de Bessel de primera especie y primer orden.

2.4.2 Solución para el caso de una bobina de sección finita sobre un material conductor plano semi-infinito

Una vez resueltas las ecuaciones del potencial vectorial producido por una espira puntual se puede aproximar el efecto de una bobina, tal como la mostrada en la Figura 2.4, con la superposición de un número n de espiras puntuales.

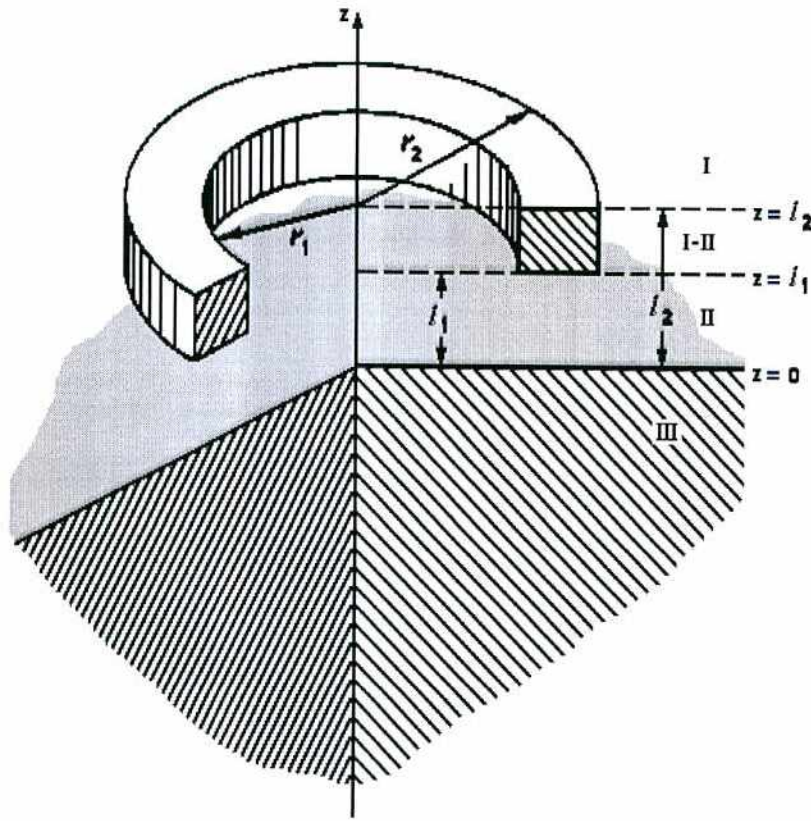


Figura 2.4

Bobina de sección rectangular sobre un material conductor plano semi-infinito.

El potencial vectorial total es, en este caso:

$$(20) \quad A(r, z) = \sum_{i=1}^n A_i(r, z) = \sum_{i=1}^n A(r, z, l_i, r_i)$$

donde la espira i -ésima tiene radio r_i y está ubicada a una altura l_i sobre el semiespacio conductor.

Esta ecuación es válida para bobinas de cualquier sección. Si la distribución de corriente de las espiras puntuales se aproximara a una distribución continua, la sumatoria se convierte en la integral a través de la sección transversal de la bobina. Si esta es de sección rectangular, como se muestra en la Figura 2.4, se tiene que

$$(21) \quad A(r, z) = \int_{r_1}^{r_2} \int_{l_1}^{l_2} A(r, z, l, r_0) dr_0 dl$$

donde $A(r, z, l, r_0)$ es el potencial vectorial producto de la aplicación de una densidad de corriente $i_0(l, r_0)$, tal que

$$(22) \quad i_0 = NI$$

siendo N la densidad de espiras por unidad de sección transversal de bobina.

A partir de aquí se supone que la densidad de corriente $i_0(l, r_0)$ aplicada es constante en la sección de la bobina, es decir, la corriente en cada espira tiene la misma fase y amplitud.

Al aplicar estos resultados a la ec. (17), se obtiene

$$(23) \quad A^{(1)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \left[\int_0^\infty \int_{r_1}^{r_2} \int_{l_1}^{l_2} r_0 J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(z-l)} \frac{\alpha}{\alpha_0} dl dr_0 d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \int_{r_1}^{r_2} \int_{l_1}^{l_2} r_0 J_1(\alpha r_0) J_1(\alpha r) e^{-\alpha_0(z+l)} \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} dl dr_0 d\alpha \right]$$

La integral en r_0 se puede expresar como

$$(24) \quad \int_{r_0=r_1}^{r_2} r_0 J_1(\alpha r_0) dr_0 = \frac{1}{\alpha^2} \int_{\alpha r_0=\alpha r_1}^{\alpha r_2} \alpha r_0 J_1(\alpha r_0) d\alpha r_0 = \frac{1}{\alpha^2} \int_{x=\alpha r_1}^{\alpha r_2} x J_1(x) dx \equiv \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1)$$

donde $\int_{x=\alpha r_1}^{\alpha r_2} x J_1(x) dx \equiv I_\alpha(r_2, r_1)$

La integral en l en el primer término es

$$(25) \quad \int_{l=l_1}^{l_2} e^{-\alpha_0(z-l)} dl = e^{-\alpha_0 z} \int_{l=l_1}^{l_2} e^{\alpha_0 l} dl = \frac{e^{-\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{\alpha_0 l_2} - e^{\alpha_0 l_1})$$

La integral en l en el segundo término es

$$(26) \quad \int_{l=l_1}^{l_2} e^{-\alpha_0(z+l)} dl = e^{-\alpha_0 z} \int_{l=l_1}^{l_2} e^{-\alpha_0 l} dl = \frac{e^{-\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2})$$

2.4 Solución de la ecuación del potencial vectorial

Luego de aplicar las ecuaciones (24), (25) y (26) a las expresiones del potencial vectorial para la región I, queda de esta manera

$$(27) \quad A^{(I)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \left[\int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \frac{e^{-\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{\alpha_0 l_2} - e^{\alpha_0 l_1}) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \frac{e^{-\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2}) \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha \right]$$

Si se aplica un procedimiento similar a las regiones II y III, éstas quedan de esta forma

$$(28) \quad A^{(II)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \left[\int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \frac{e^{\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2}) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \frac{e^{-\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2}) \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha \right]$$

$$(29) \quad A^{(III)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^2} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \frac{e^{\alpha_0 z}}{\alpha_0} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2}) \left(\frac{2\mu_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{\alpha}{\alpha_0} d\alpha$$

La ec. (27) es válida en la región I, por encima de la bobina, y la ec. (28) es válida para la región II entre la bobina y el conductor plano. A la región I-II, entre las partes superior e inferior de la bobina, se le da un tratamiento especial. Para un punto (r, z) en la región I-II, se puede usar la ecuación de $A^{(I)}(r, z)$ para la parte de la bobina desde z hasta l_1 y la ecuación $A^{(III)}(r, z)$ para la parte de la bobina desde z hasta l_2 . Si se substituye $l_2 = z$ en la cc. (27) y $l_1 = z$ en la (28) y se suman ambas ecuaciones, se obtiene

$$(30) \quad A^{(I-II)}(r, z) = \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \left\{ \int_0^\infty \frac{1}{\alpha} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \left[2 - e^{-\alpha_0(z-l_1)} - e^{\alpha_0(z-l_2)} \right] \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \left[e^{-\alpha_0 z} (e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2}) \right] \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha \right\}$$

2.4.3 Cálculo de las variables eléctricas medibles

Una vez determinado A , es posible calcular las variables eléctricas medibles, en forma sencilla [46]:

2.4.3.1 Corrientes inducidas

Por Ley de Ohm

$$(31) \quad J = \sigma E = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -j\omega\sigma A$$

debido a la simetría axial, la ec. (31) se presenta

$$(32) \quad J = -j\omega\sigma A(r, z)$$

donde $A(r, z)$ viene dado por la ec. (29).

2.4.3.2 Tensión inducida

La tensión inducida en un conductor es

$$(33) \quad V = j\omega \int A(r, z) \cdot ds$$

Para el caso de una espira circular de radio r , la ec. (33) queda

$$(34) \quad V = j\omega 2\pi r A(r, z)$$

La tensión inducida en una bobina con n espiras es

$$(35) \quad V = j2\pi\omega \sum_{i=0}^n r_i A(r_i, z_i)$$

Se aproxima la sumatoria anterior por una integral, utilizando una densidad de N espiras por unidad de sección transversal de bobina

$$(36) \quad V \approx j2\pi\omega \iint_S r A(r, z) N dr dz$$

Si se supone una densidad de espiras N constante, de modo que:

$$N = \frac{n}{S}$$

donde n es el número total de espiras y S la sección transversal de la bobina, queda

$$(37) \quad V = j2\pi\omega \frac{n}{S} \iint_S r A(r, z) dr dz$$

La tensión autoinducida es

$$(38) \quad V = j2\pi\omega \frac{n}{S} \int_{r_1}^{r_2} \int_{z_1}^{z_2} r A^{(I-H)}(r, z) dr dz$$

y reemplazando la ec. (30) en la ec. (38), sabiendo que $S = (l_2 - l_1)(r_2 - r_1)$

$$(39)$$

$$V = \frac{j2\pi\omega n}{(l_2 - l_1)(r_2 - r_1)} \frac{1}{2} \mu_0 i_0 \left\{ \int_0^\infty \int_{l_1}^{l_2} \int_{r_1}^{r_2} r \left[\frac{1}{\alpha} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \left[2 - e^{-\alpha_0(z-l_1)} - e^{\alpha_0(z-l_2)} \right] \frac{1}{\alpha_0^2} \right] (r, z) dr dz d\alpha + \right. \\ \left. \int_0^\infty \int_{l_1}^{l_2} \int_{r_1}^{r_2} r \left[\frac{1}{\alpha} I_\alpha(r_2, r_1) J_1(\alpha r) \left[e^{-\alpha_0 z} \left(e^{-\alpha_0 l_1} - e^{-\alpha_0 l_2} \right) \right] \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^2} \right] (r, z) dr dz d\alpha \right\}$$

aplicando las ecuaciones (24), (25) y (26), queda

$$(40) \quad V = \frac{j\pi\omega n \mu_0 i_0}{(l_2 - l_1)(r_2 - r_1)} \left\langle \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} \left[e^{-\alpha_0(l_2-l_1)} - 1 \right] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left[-2e^{-\alpha_0(l_2+l_1)} + e^{-2\alpha_0 l_2} + e^{-2\alpha_0 l_1} \right] \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^3} d\alpha \right\rangle$$

2.4.3.3 Impedancia de la bobina

Con la tensión autoinducida se puede calcular la impedancia de la bobina

$$(41) \quad Z = \frac{V}{I}$$

La intensidad de corriente en una espira está relacionada con la densidad de corriente aplicada i_0 , por

$$(42) \quad i_0 = \frac{nI}{(l_2 - l_1)(r_2 - r_1)}$$

Reemplazando las ec. (40) y (42) en la (41), la impedancia de la bobina queda entonces como

$$(43) \quad Z = \frac{j\pi\omega \mu_0 n^2}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \left\langle \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} \left[e^{-\alpha_0(l_2-l_1)} - 1 \right] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left[-2e^{-\alpha_0(l_2+l_1)} + e^{-2\alpha_0 l_2} + e^{-2\alpha_0 l_1} \right] \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^3} d\alpha \right\rangle$$

Esta ecuación se puede generalizar normalizando todas las dimensiones en términos del radio medio de bobina

$$(44) \quad r = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

Todas las longitudes se dividen por el radio medio y todas las α se multiplican por él.

Luego de la normalización, la ec. (43) queda

$$(45) \quad Z = \frac{j\pi\omega\mu_0 n^2 \tilde{r}}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \left\langle \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} [e^{-\alpha_0(l_2 - l_1)} - 1] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha + \right. \\ \left. + \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) [-2e^{-\alpha_0(l_2 + l_1)} + e^{-2\alpha_0 l_2} + e^{-2\alpha_0 l_1} \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^3} d\alpha \right] \right\rangle$$

La impedancia puede ser normalizada dividiéndola por la magnitud de la impedancia de la bobina en aire. Cuando la bobina está en el aire $\alpha_1 = \alpha_0$, entonces

$$(46) \quad Z = \frac{j\pi\omega\mu_0 n^2 \tilde{r}}{(l_2 - l_1)^2 (r_2 - r_1)^2} \int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} [e^{-\alpha_0(l_2 - l_1)} - 1] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha$$

Dividiendo la ec. (45) por la ec. (46) resulta la impedancia normalizada

$$(47) \quad Z_{nor} = 1 + j \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) [-2e^{-\alpha_0(l_2 + l_1)} + e^{-2\alpha_0 l_2} + e^{-2\alpha_0 l_1} \left(\frac{\mu_1 \alpha_0 - \mu_0 \alpha_1}{\mu_1 \alpha_0 + \mu_0 \alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_0^3} d\alpha]}{\int_0^\infty \frac{1}{\alpha^3} I_\alpha^2(r_2, r_1) \left\{ 2(l_2 - l_1) + \frac{2}{\alpha_0} [e^{-\alpha_0(l_2 - l_1)} - 1] \right\} \frac{1}{\alpha_0^2} d\alpha}$$

Esta ecuación (47) será utilizada en la Sección siguiente y en el Capítulo III, para el cálculo de impedancias de sonda, y de las propiedades electromagnéticas de aceros inoxidables austeníticos.

Esta ecuación es válida si se cumplen todas las hipótesis mencionadas:

- configuración axisimétrica,
- ausencia de fenómenos capacitivos,
- densidad de corriente aplicada constante,
- densidad de espiras constante en la bobina,
- material con conductividad eléctrica σ constante,
- material con permeabilidad magnética μ constante.

Las cuatro primeras hipótesis se pueden cumplir eligiendo una configuración experimental apropiada, es decir, utilizando una sonda cilíndrica con una distribución de espiras uniforme, asegurando que las probetas estén eléctricamente descargadas y tengan las dimensiones adecuadas al tamaño de la sonda.

La conductividad eléctrica se mantendrá constante siempre que las muestras se mantengan uniformes y homogéneas. La hipótesis de permeabilidad magnética constante, se logra empleando materiales con esta característica o bien, materiales magnéticamente blandos, siempre y cuando se empleen intensidades de campo magnético menores que la correspondiente al inicio de la etapa de saturación magnética.

2.5 Simulaciones computacionales

La ecuación (47) fue programada como función (Apéndice I) utilizando el programa MATHEMATICA® 2.2.3 [50, 51], y permite calcular la impedancia de la bobina conociendo las propiedades electromagnéticas del medio y las dimensiones de la bobina.

A fin de apreciar el funcionamiento del modelo y el programa, se hicieron distintas simulaciones [52, 53], las cuales se compararon en forma satisfactoria (ver Sección 6.1) con gráficos obtenidos en la bibliografía [40], entre las que se seleccionaron las siguientes, que se presentan a modo de ejemplo:

- En primer lugar se graficaron curvas para distintos valores de las variables σ (conductividad eléctrica) y μ_r (permeabilidad magnética relativa). Los resultados se muestran en la Figura 2.5, el cual representa el plano de impedancia compleja. Todas las impedancias calculadas y representadas en la Figura 2.5 fueron calculadas para una frecuencia de 90 kHz. Los puntos rojos en el gráfico representan Z_{nor} (impedancias de sonda normalizada) calculadas para diferentes valores de σ que van desde 10 a 10^{10} S/m y μ_r igual a 1. Los puntos violeta representan Z_{nor} correspondientes al mismo rango de σ pero en este caso con $\mu_r = 10$. Los puntos negros representan Z_{nor} correspondientes a $\sigma = 10^5$ S/m y μ_r en el rango de 1 a 512. Los puntos azules representan Z_{nor} correspondientes a $\sigma = 10^6$ S/m y μ_r en el rango de 1 a 512. Los puntos verdes representan Z_{nor} correspondientes a $\sigma = 10^7$ S/m y μ_r en el rango de 1 a 512.

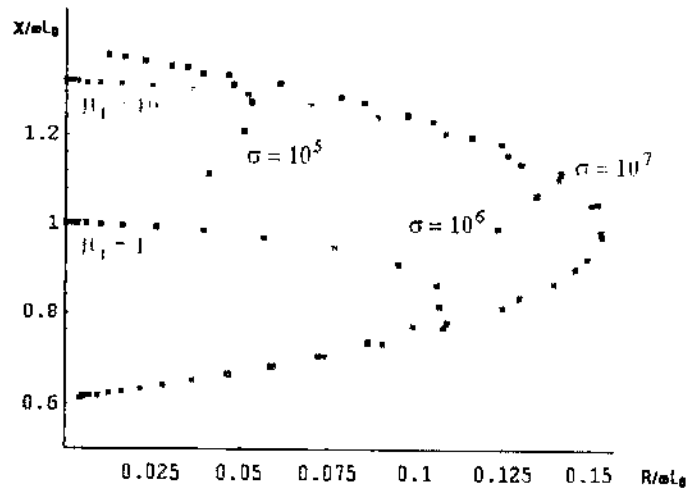


Figura 2.5

Simulación del plano de impedancia compleja normalizada ($f = 90\text{kHz}$).

En las curvas roja y violeta, σ varía desde 10 a 10^{10} S/m.

En las curvas negra, azul y verde, μ_r varía en el rango de 1 a 512.

- En la Figura 2.6, se pueden apreciar diferentes curvas de lift off (distancia entre la bobina y la probeta), para diferentes materiales con distintos valores de conductividad eléctrica, todos con permeabilidad magnética $\mu_r = 1$. Puede también observarse en este gráfico cómo se corre el punto de operación, conforme cambia σ .

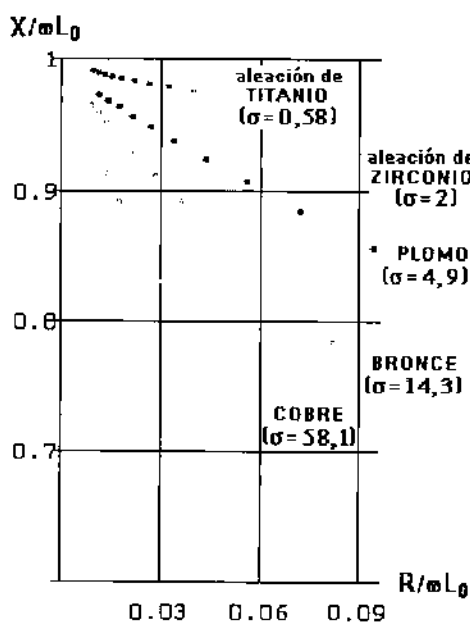


Figura 2.6
Curvas simuladas de lift off, con $\mu_r = 1$ ($\sigma [10^6 \text{ S/m}]$; $f = 90\text{kHz}$).

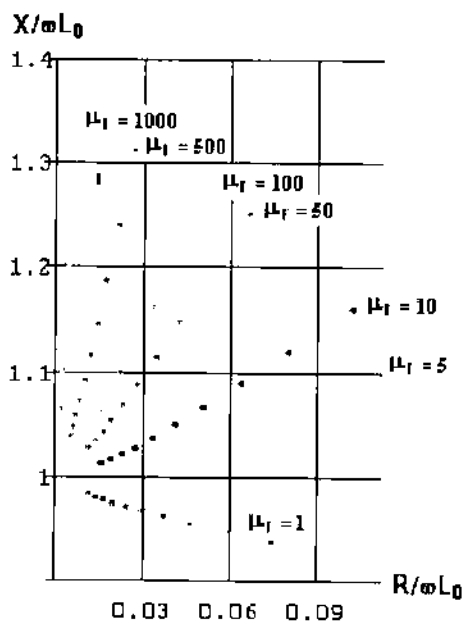


Figura 2.7
Curvas simuladas de lift off, para un material con $\sigma = 1,388 \times 10^6 \text{ S/m}$ y diferentes valores de μ_r ($f = 90\text{kHz}$).

2.5 Simulaciones computacionales

- En la Figura 2.7, se pueden apreciar diferentes curvas de lift off, para un acero (ASTM 508 class 2) con conductividad eléctrica $\sigma = 1.388 \times 10^6$ S/m y distintos valores de permeabilidad magnética.
- En la Figura 2.8, se puede ver el efecto de variar la frecuencia de ensayo en una aleación de zirconio con conductividad eléctrica $\sigma = 1.887 \times 10^6$ S/m y $\mu_r = 1$.

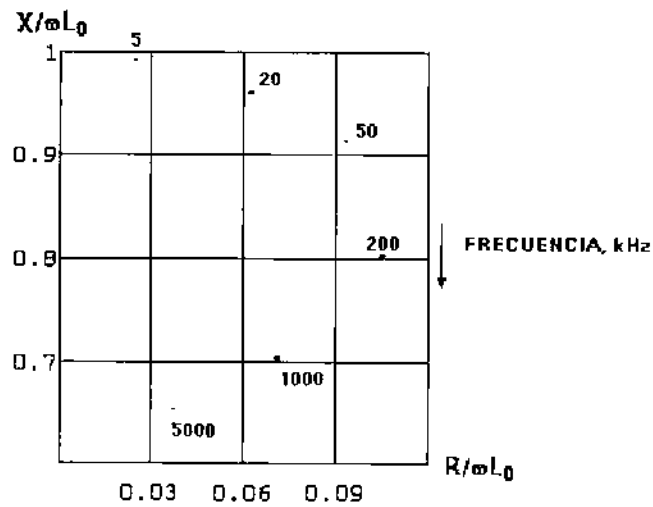


Figura 2.8
Simulación con la ubicación del punto de trabajo para diferentes frecuencias,
para un material con $\sigma = 1.887 \times 10^6$ S/m y $\mu_r = 1$

CAPITULO III

Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

3.1 Materiales

Para el desarrollo de este trabajo se estudiaron tres series de probetas correspondientes a tres tipos de aceros comerciales inoxidables austeníticos: AISI 304, 316 y 347 (ver composición en Tabla 3.1), disponibles en el laboratorio y que fueron preparadas por P. Álvarez y A. Hey [25]. La ruta de fabricación de estas series de muestras indica que se obtuvieron a partir de chapas y fueron sometidas a un recocido inicial de 1050 °C durante una hora en horno de vacío y enfriadas en aire, a fin de unificar las estructuras iniciales. Luego, todas las probetas fueron deformadas un 63% a -70 °C por laminación a fin de inducir la transformación de fase $\gamma \rightarrow \alpha'$, con lo que se produjo una proporción máxima de martensita. Con un tratamiento térmico posterior a tiempo constante y distintas temperaturas se recuperaba la fase γ en distintas proporciones en cada muestra, obteniéndose de esta manera probetas con diferentes contenidos de martensita. Todas las probetas miden aproximadamente 65 x 30 x 2,3 mm. La serie de probetas AISI 347 se compone de 11 ejemplares numerados de 0 a 9 y 11. La serie de probetas AISI 316 se compone de 11 ejemplares numerados de 0 a 10. La serie de probetas AISI 304 se compone de 10 ejemplares numerados de 2 a 4 y 6 a 12.

Tabla 3.1

Composición de las probetas de acero inoxidable (% en peso) [25]

	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
347	0,05	1,48	0,44	9,88	17,52	0,36	0,044	Bal.
304	0,07	1,17	0,43	9,86	18,46	0,60	0,015	Bal.
316	0,05	1,04	0,60	11,48	16,16	2,08	0,015	Bal.

Para las calibraciones se usaron los patrones de conductividad n° 4 y 5 de Zetec, Inc, y una muestra de acero ASTM 508 clase 2 utilizado como patrón de permeabilidad magnética certificado [54], cuyas propiedades electromagnéticas se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2
Conductividad y permeabilidad de los patrones certificados

Material	Identificación	Conductividad [S/m]	Permeabilidad Magnética Relativa
Estándar 4 Zetec	P4	$2,036 \cdot 10^6$	1
Estándar 5 Zetec	P5	$0,554 \cdot 10^6$	1
ASTM 508 clase 2	PPM	$1,388 \cdot 10^6$	206

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

Para lograr la caracterización electromagnética de los materiales, es necesario calcular a través de un modelo la impedancia de las muestras de acero inoxidable partiendo de la información obtenida en un ensayo no destructivo de corrientes inducidas. Para ello se estableció el siguiente procedimiento:

- Adquisición de datos
- Representación de los datos obtenidos en el plano complejo de impedancias
- Estimación de la conductividad eléctrica
- Estimación de la permeabilidad magnética

3.2.1 Adquisición De Datos

Para hacer las mediciones experimentales se utilizó un equipo MAD8D™ de Eddy Current Technology, Inc. (ver Figura 3.1) en modo puente de impedancias, utilizando como sonda un palpador Zetec “6298” (ver Figura 3.2) apto para trabajar con frecuencias de ensayo entre 50 y 500 kHz.



Figura 3.1
MAD8D™

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

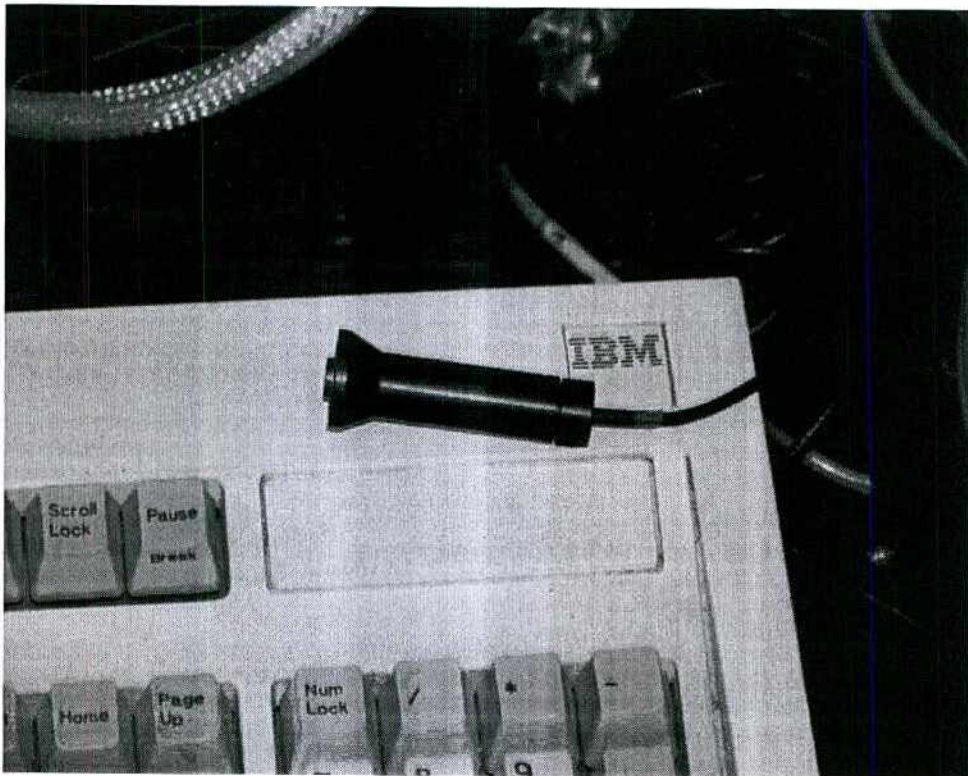


Figura 3.2
Palpador Zetec “6298”



Figura 3.3
Vista de las tarjetas ISA del MAD8D™

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

Este equipo consta de una serie de tarjetas ISA, que se insertan en una PC (ver Figura 3.3), el software corre bajo DOS® y puede adquirir datos usando hasta cuatro frecuencias de ensayo diferentes en forma simultánea. Cada una de estas tarjetas es un equipo de corrientes inducidas completo, con su propio generador de ondas, filtros, amplificadores, etc.

Las dimensiones de la bobina utilizada (Figura 3.2) son:

- radio interior (r_1): 0,5 mm,
- radio exterior (r_2): 1,1 mm,
- altura (h): 2,0 mm,
- número de espiras: 200,

que se representan esquemáticamente en la Figura 3.4.

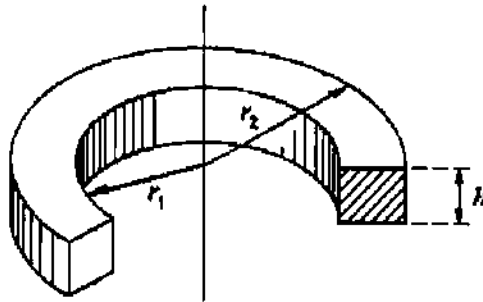


Figura 3.4

Esquema de la sonda utilizada en los ensayos de corrientes inducidas

El equipo proporciona una onda cuadrada de 4 volt de tensión pico a pico, a través de una resistencia de 50 ohm (no aparece en el esquema simplificado de la Figura 3.5). El emplear una onda cuadrada permite que en la sonda estén presentes todas las frecuencias de manera simultánea y continua. La información de las frecuencias individuales elegidas para un ensayo, se seleccionan mediante filtros. Esta configuración permite una mayor velocidad de inspección.

Un equipo de corrientes inducidas como el MAD8D™ consiste en un puente de Wheatstone para corriente alterna (Figura 3.5). En este puente, la bobina de ensayo, junto con una bobina de referencia, se conectan en paralelo con las resistencias variables R_1 y R_2 . El balance del puente se logra variando estas resistencias [40].

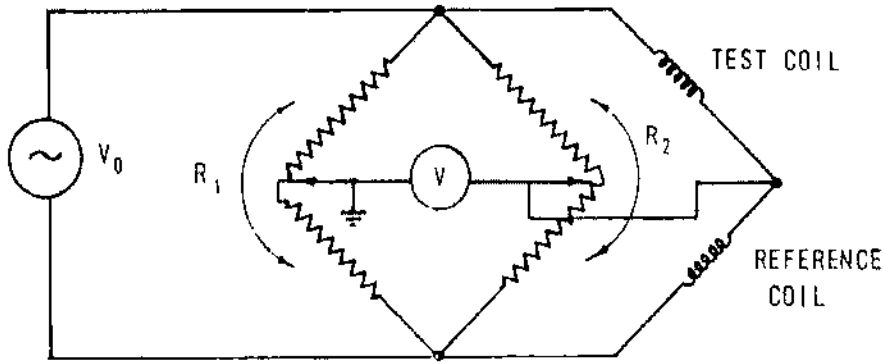


Figura 3.5

Esquema de un equipo para corrientes inducidas tipo puente [40].

Las frecuencias utilizadas en cada ensayo fueron: 60, 90, 120 y 240 kHz, elegidas para lograr distintas profundidades de penetración estándar. Se define la profundidad de penetración estándar δ como la profundidad a la cual la intensidad de la corriente se atenúa hasta el 37% del valor correspondiente a la superficie del material. A los efectos de su cálculo, la norma de ensayos [55] establece que:

$$(48) \quad \delta = \frac{503.3}{\sqrt{f\sigma\mu_r}}$$

donde la frecuencia de ensayo f se expresa en Hz, la conductividad eléctrica del material σ en S/m, δ en m y la permeabilidad magnética μ_r es adimensional. En la Tabla 3.3 se muestran los valores calculados para las muestras austeníticas puras de cada serie, es decir, con $\mu_r = 1$. La segunda fila consta de los valores de frecuencia seleccionados, expresados en kHz. En la segunda columna están los valores de conductividad [56] correspondientes a cada material expresados en S/m. Los valores calculados de profundidad de penetración estándar, en metros, se encuentran de la fila 3ª para abajo y de la columna 3ª a la derecha.

Tabla 3.3

Profundidad de penetración estándar δ en m

Material		Frecuencia en kHz			
Aleación	Conductividad en S/m [56]	60	90	120	240
		δ [m]	δ [m]	δ [m]	δ [m]
AISI 304	$1.43 \cdot 10^6$	$1.72 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$0.86 \cdot 10^{-3}$
AISI 316	$1.37 \cdot 10^6$	$1.76 \cdot 10^{-3}$	$1.43 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^{-3}$	$0.88 \cdot 10^{-3}$
AISI 347	$1.39 \cdot 10^6$	$1.74 \cdot 10^{-3}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^{-3}$	$0.87 \cdot 10^{-3}$

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

El ensayo consiste en posar la sonda sobre la probeta a ensayar durante un par de segundos. Cuando se ensayan una serie de muestras junto con algunos patrones, se colocan todas las piezas en forma próxima, tal que el ensayo de una serie completa lleva aproximadamente 30 segundos.

Los resultados de la inspección pueden ser visualizados en la pantalla de la computadora, tanto como figuras de Lissajous (x, y) (Figura 3.6), como registros independientes (x, t) y (y, t). Si bien estos datos están en cuadratura, su fase es arbitraria y no se corresponde con las tensiones resistiva e inductiva sobre el sensor. Alternativamente se puede acceder al archivo digital de esta información para procesarla informáticamente. Cabe aclarar que el equipo no entrega información correspondiente al plano de impedancias, ni consta en su documentación cómo obtenerla.

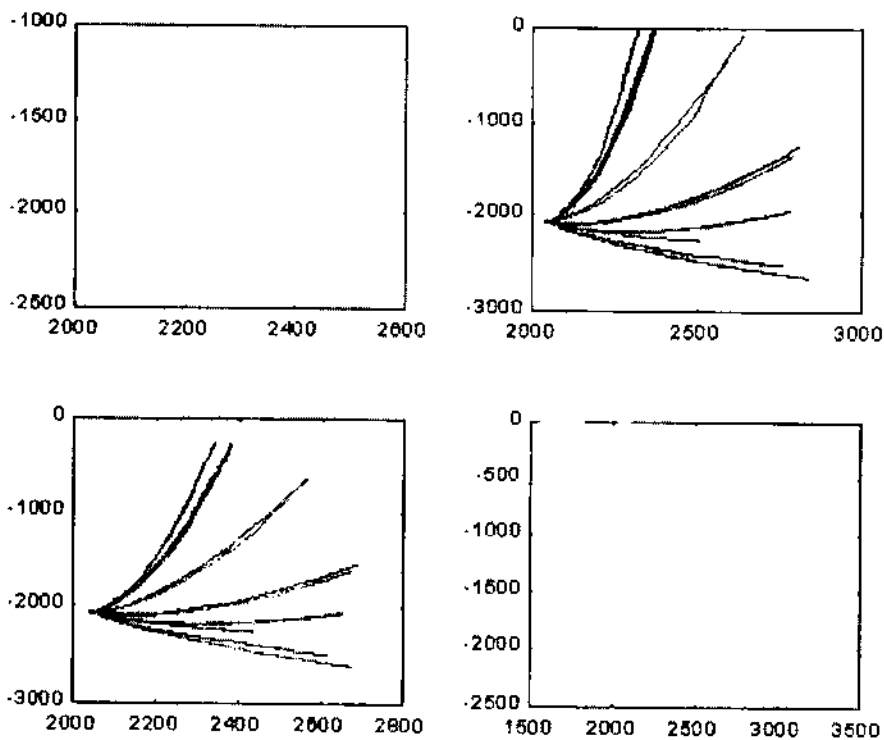


Figura 3.6

Representación de curvas de Lissajous creadas por el MAD8D™. Unidades: milivoltios
Cada recuadro corresponde a uno de los cuatro canales.

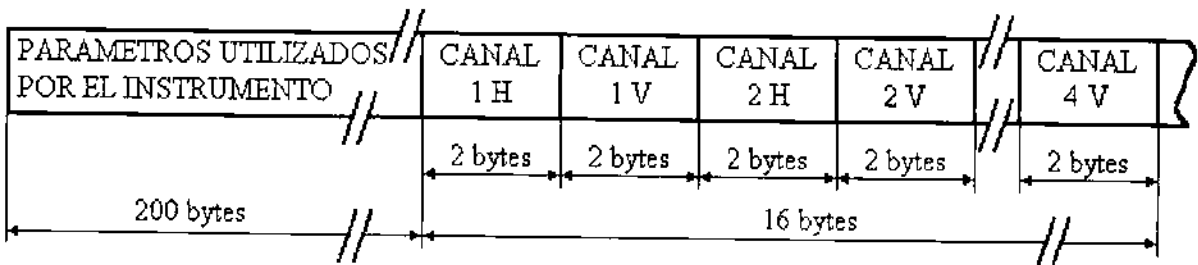


Figura 3.7

Estructura de los archivos digitales creados por el MAD8D™

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

Este archivo tiene un formato de datos en el cual los primeros doscientos bytes grabados son una tabla que contiene información acerca de los parámetros utilizados por el instrumento de corrientes inducidas para efectuar el ensayo. A partir del 200° byte, la información en bruto de las corrientes inducidas se almacena en el archivo en bloques de dieciséis bytes (ver Figura 3.7).

3.2.2 Representación de los datos obtenidos en el plano complejo de impedancias

3.2.2.1 Procedimiento

Para leer el archivo de datos generado por el MAD8D™ e identificar y extraer los valores de tensión correspondientes a los puntos dato y los puntos incógnita, se escribió un programa de computación en lenguaje Pascal [52, 53, 57], cuyo listado de instrucciones puede verse en el Apéndice II. Este programa permite identificar numéricamente, en el archivo de datos secuenciales ($H_i(t)$, $V_i(t)$) el extremo de cada una de las curvas $Z_i(H,V)$ de la Figura 3.6, y grabar la información obtenida en un archivo utilizando el formato de números enteros.

Como se vio en la sección anterior, las coordenadas (H;V) de la información entregada por el MAD8D™ se encuentran en un plano de tensiones horizontal y vertical, que en general no representan las componentes resistiva e inductiva de las tensiones medidas por la sonda. Esto es así, porque en los ensayos la fase se elige arbitrariamente, a fin de facilitar al operador la lectura de la información en pantalla. Como generalmente la orientación y escala de estos dos planos (el plano (H;V) de tensiones medidas experimentalmente y el plano complejo de impedancias (Z)) no es coincidente, se propone una transformación lineal, que incluye la posibilidad de traslación, dilatación o rotación entre ambos sistemas de coordenadas, la cual ya ha sido utilizada eficazmente en trabajos anteriores [52, 53, 58, 59].

La Figura 3.8 muestra los datos obtenidos por el equipo de ensayos correspondiente al canal de 240 kHz, durante un ensayo de la serie AISI 347, en el que se han identificado los puntos dato y los puntos incógnita, todos ellos extremos de las diferentes curvas de lift-off analizadas con el programa del Apéndice II. Los puntos dato son los puntos identificados como A, B y C y corresponden a tensiones generadas cuando la bobina está acoplada a muestras de propiedades electromagnéticas conocidas. El punto A representa las tensiones generadas con la bobina en aire, el punto B cuando está acoplada al patrón de conductividad eléctrica P4 y el punto C cuando está acoplada al patrón de permeabilidad magnética PPM (P4 y PPM se presentan en la Tabla 3.2). Los puntos incógnita son los restantes identificados con números (del 0 al 9 y 11 en la Figura 3.3), y corresponden a tensiones de bobina cuando está acoplada a las muestras de la serie AISI 347 en estudio.

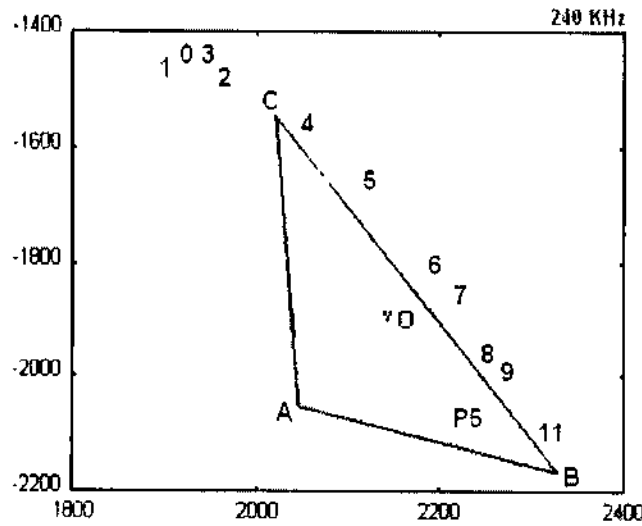


Figura 3.8

Identificación de los puntos dato y los puntos incógnita. A: bobina en aire. B: bobina sobre P4. C: bobina sobre PPM. Los números identifican las probetas de la serie AISI 347. Canal de 240 kHz.

A partir del procesamiento del archivo MAD8D™, se pueden conocer las coordenadas de los vértices del triángulo V_0 (ver Figura 3.8) formado por los puntos A, B y C en el plano de tensiones. Con la ecuación (47), deducida durante este trabajo, y las dimensiones de la sonda utilizada, se pueden calcular las impedancias correspondientes a los puntos dato en el plano complejo de impedancias, determinando, entonces las coordenadas de los vértices del triángulo $A'B'C'$. Con toda esta información, es posible, entonces, determinar la matriz de transformación $T: (I;V) \rightarrow (Z)$ [59, 60], que vincula ambos planos, el de tensiones y el de impedancias, resolviendo la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} x_A & y_A & 1 \\ x_B & y_B & 1 \\ x_C & y_C & 1 \end{bmatrix} \cdot [T] = \begin{bmatrix} x'_A & y'_A & 1 \\ x'_B & y'_B & 1 \\ x'_C & y'_C & 1 \end{bmatrix},$$

donde (x_n, y_n) son las coordenadas del punto n en el plano de tensiones medidas experimentalmente (Figura 3.8) y (x'_n, y'_n) son las coordenadas del punto n en el plano de impedancias. Una vez determinada esta matriz de transformación, es posible calcular las coordenadas de los puntos restantes en el plano de impedancias. En la Figura 3.9, se pueden ver los vértices del triángulo $A'B'C'$ y los puntos incógnita (los puntos numerados del 0 al 9 y 11) ya transformados al plano de impedancias.

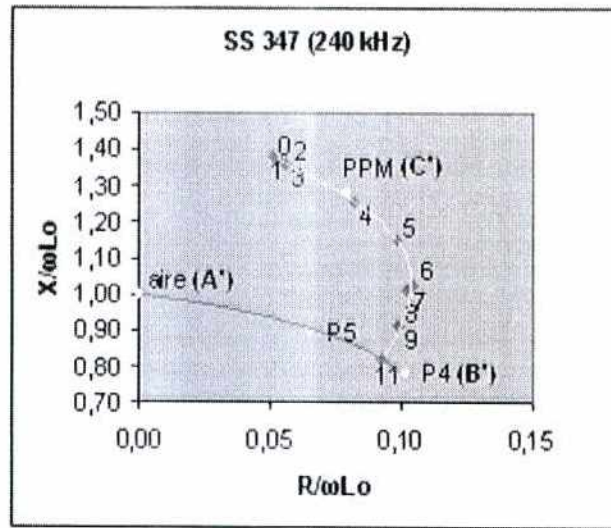


Figura 3.9

Puntos dato (amarillos) y puntos incógnita (rojos) en el plano de impedancias complejo. Curva de conductividad con $\mu_r = 1$ (azul). Curva de permeabilidad magnética con $\sigma = 1.39 \cdot 10^6$ S/m (verde)

Para determinar la matriz T y transformar las coordenadas de todos los puntos del plano de tensiones al plano de impedancias complejo se escribió un programa con el software MATHEMATICA®, versión 2.2.3, de Wolfram Research, Inc. [50, 51, 52, 53], el cual puede verse en el Apéndice III.

3.2.2.2 Resultados

Se realizaron 20 ensayos sobre cada serie de muestras a fin de minimizar la incidencia de los errores estadísticos. Se promediaron los resultados obtenidos en cada ensayo. Dado el carácter aleatorio de este tipo de errores, es entendible que, al promediar los resultados, el promedio esté menos afectado de las desviaciones estadísticas que los valores individuales. Si la cantidad a medir es a , y se han hecho N mediciones $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$, se puede demostrar que el mejor estimador de la

cantidad a es el promedio $\bar{a}$ de las N mediciones [61]: $\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{N}$.

También se utilizó la desviación estándar o error cuadrático medio S_a , que da una idea

global acerca de la dispersión de los datos a_i alrededor del promedio: $S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{N - 1}}$.

Si la distribución de las mediciones es muy dispersa, S_a será grande en comparación con $\bar{a}$, y si los valores están concentrados, S_a será pequeño. S_a tiene las mismas dimensiones físicas que $\bar{a}$, pudiéndose comparar directamente con ésta. La calidad del proceso de medición será mayor cuanto

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

menor sea la relación $S_a/\bar{a}$, que en general es una constante del proceso de medición y no disminuye al aumentar N [62]. Aunque 20 mediciones no es una cantidad ideal para lograr la estimación precisa de la desviación estándar, los valores calculados permiten inferir que ésta es pequeña.

Los resultados se organizaron en tablas, que se encuentran en el Apéndice VI. En ellas se puede apreciar que la relación $S_a/\bar{a}$ se mantiene, en todas las series y para todas las frecuencias, por debajo de 0,05 en el caso de la resistencia y por debajo de 0,009 en caso de la reactancia, indicando que en estos ensayos los errores estadísticos son muy bajos. Con los resultados obtenidos se elaboraron distintas gráficas que a continuación se muestran.

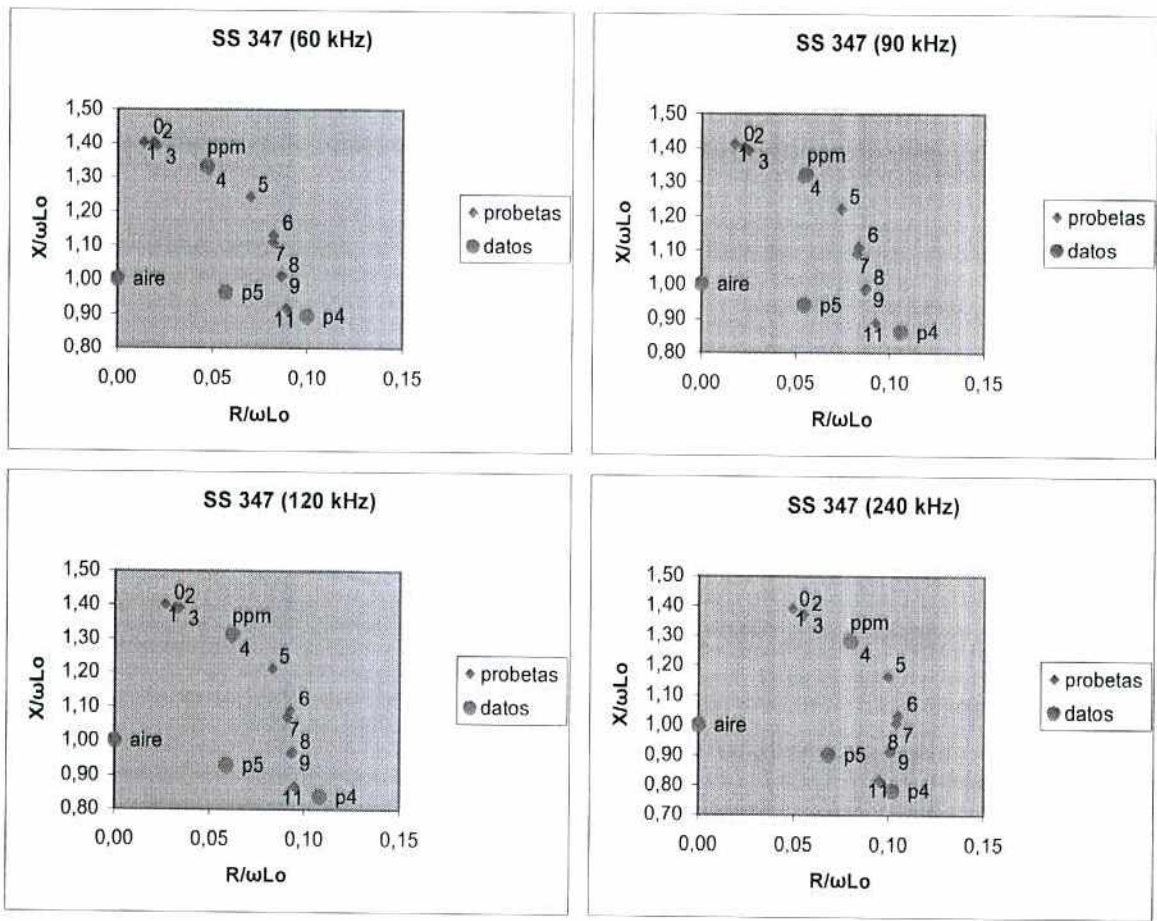


Figura 3.10
Representación en plano de impedancia: Serie AISI 347.

En primer término se presentan los gráficos correspondientes a la serie SS 347. En la Figura 3.10 se representa el plano de impedancias complejo de la serie SS 347, con la resistencia normalizada en abscisas y la reactancia normalizada en ordenadas, para cada una de las cuatro

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

frecuencias de ensayo. En estos gráficos los números corresponden a las probetas de la serie, P4 y P5 a los patrones de conductividad eléctrica y PPM al patrón de permeabilidad magnética.

En la secuencia de figuras, se puede apreciar que los valores calculados se disponen en el plano de acuerdo con las curvas teóricas vistas en la sección 2.5. Los valores calculados para cada frecuencia ensayada son parecidos, demostrando una pequeña dependencia la impedancia respecto de la frecuencia de ensayo. Esto se debe a que la frecuencia afecta la penetración de las corrientes inducidas (ver ecuación (47)), desplazando el punto de trabajo sobre la curva de conductividad constante. El rango de las variaciones de reactancia (aproximadamente 0,6) es mucho más amplio (un orden de magnitud mayor) que el de las variaciones de resistencia (0,08).

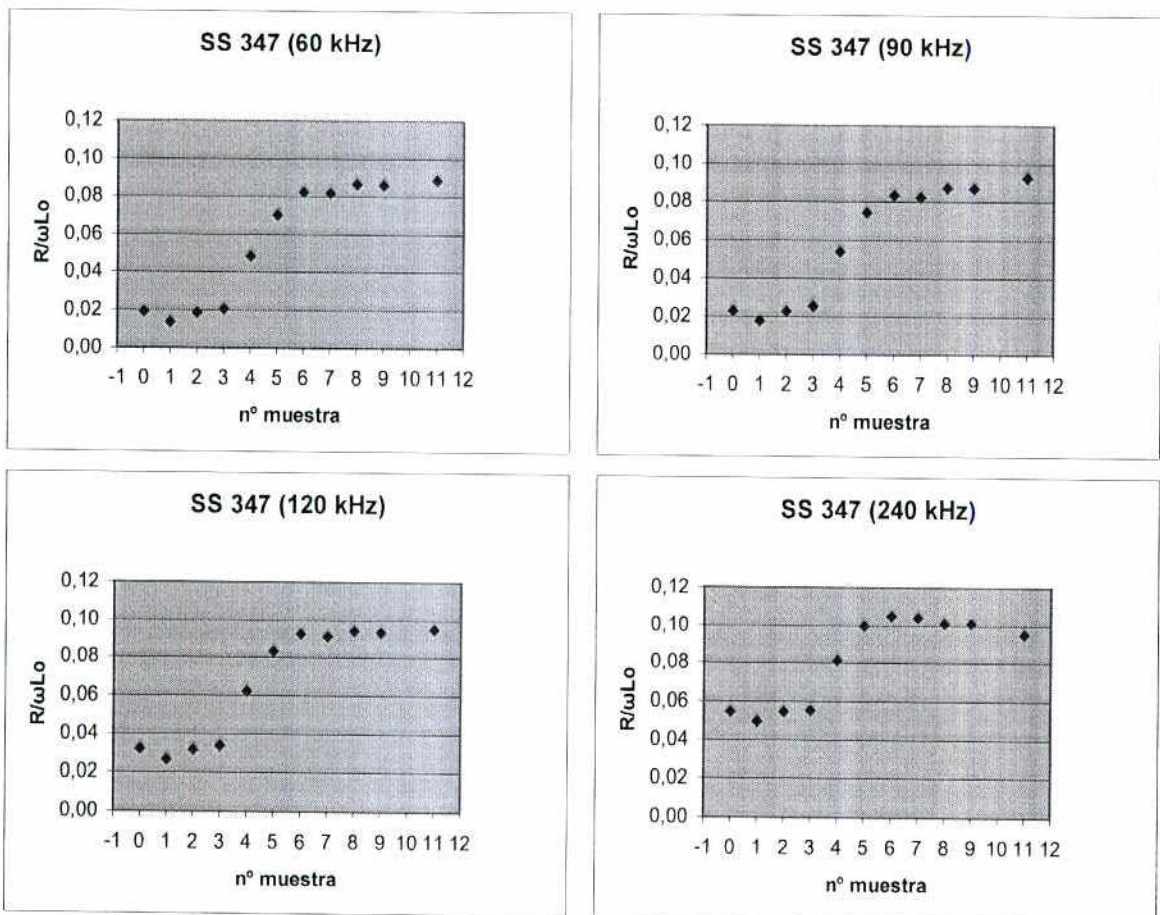


Figura 3.11
Resistencia normalizada para cada probeta de la serie AISI 347.

En la Figura 3.11 se representan los valores obtenidos de resistencia normalizada como función del número de probeta. Cabe recordar que el número de probeta está asociado con la temperatura creciente del tratamiento térmico a que fueron sometidas para recuperar la fase austenita. En dichas gráficas, se puede ver la diferencia de valores de esta magnitud existente entre

las muestras predominantemente austeníticas y las predominantemente martensíticas. Por un lado un nivel (bajo en este caso) observado en las muestras predominantemente martensíticas (0 a 3); y otro nivel (alto en este caso) para las muestras predominantemente austeníticas (6 a 9 y 11). Las muestras 4 y 5 hacen la transición entre los dos niveles.

Este patrón de comportamiento de la serie SS 347: muestras predominantemente martensíticas en un nivel, muestras predominantemente austeníticas en otro y las muestras 4 y 5 en la transición, se mantendrá, como se irá viendo a lo largo de este trabajo, incluso en distintos tipos de ensayos.

En la Figura 3.12 se representan los valores obtenidos de reactancia normalizada como función del número de probeta. También en estas gráficas, se puede ver el patrón de comportamiento mencionado entre las muestras predominantemente austeníticas y las predominantemente martensíticas, sólo que en este caso el nivel alto (alrededor de 1,4) corresponde a las muestras predominantemente martensíticas y el nivel bajo a las predominantemente austeníticas. El nivel bajo no está tan claramente definido como en el caso de la resistencia.

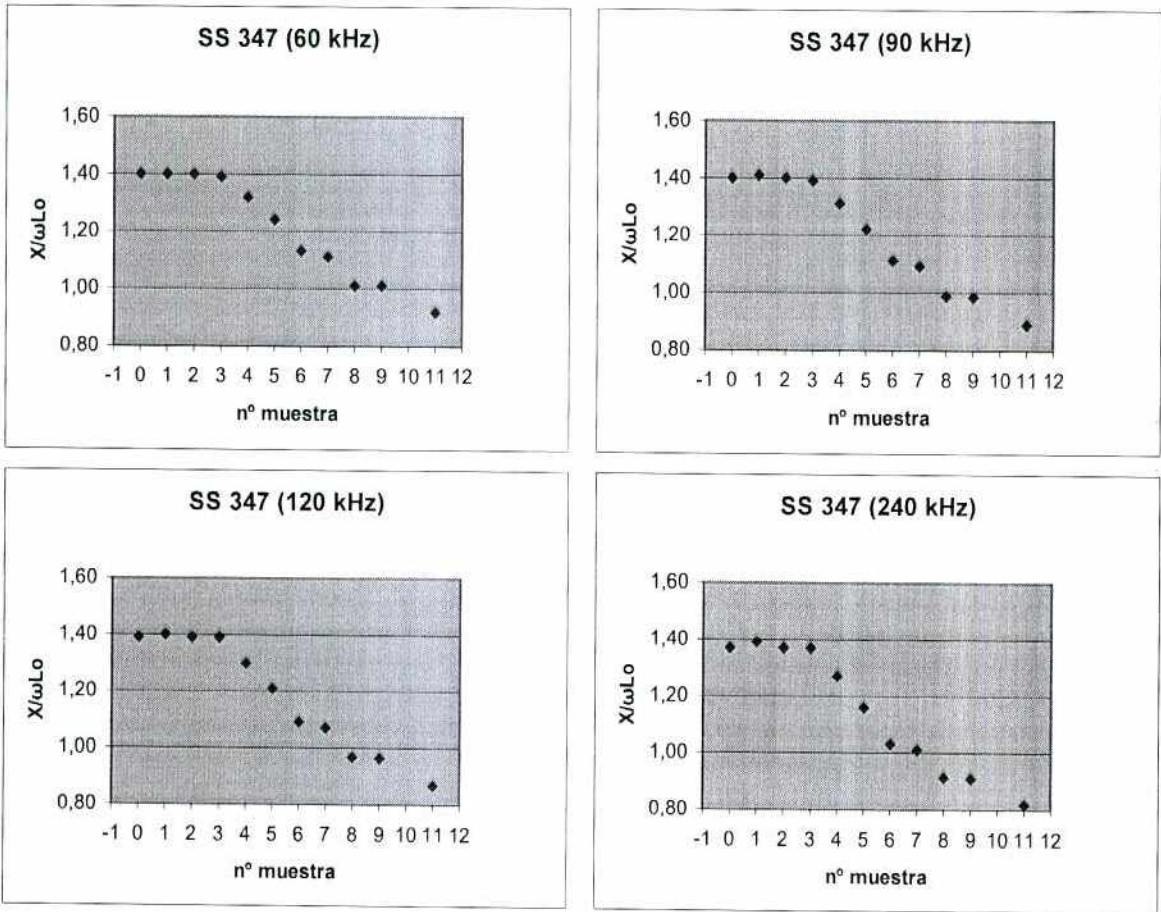


Figura 3.12
Reactancia normalizada para cada probeta de la serie AISI 347.

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

En segundo término se exponen las gráficas correspondientes a la serie SS 316 [53]. La figura 3.13 representa el plano complejo normalizado para esta serie. También estas gráficas, igual que las de la serie SS 347, confirman el comportamiento teórico expuesto en la sección 2.5. Se aprecia además que no se han alcanzado los niveles tan altos de reactancia normalizada que se vieron en la serie SS 347. En el caso anterior los valores más altos alcanzaron niveles cercanos a 1,4 y en este caso no superaron el nivel de 1,2. A partir de este gráfico se puede suponer que todas las muestras de esta serie tienen menor permeabilidad magnética que el patrón (PPM). El rango de variación de la resistencia normalizada es de 0,012, veinticinco veces menor que el correspondiente a la reactancia normalizada que es de 0,3.

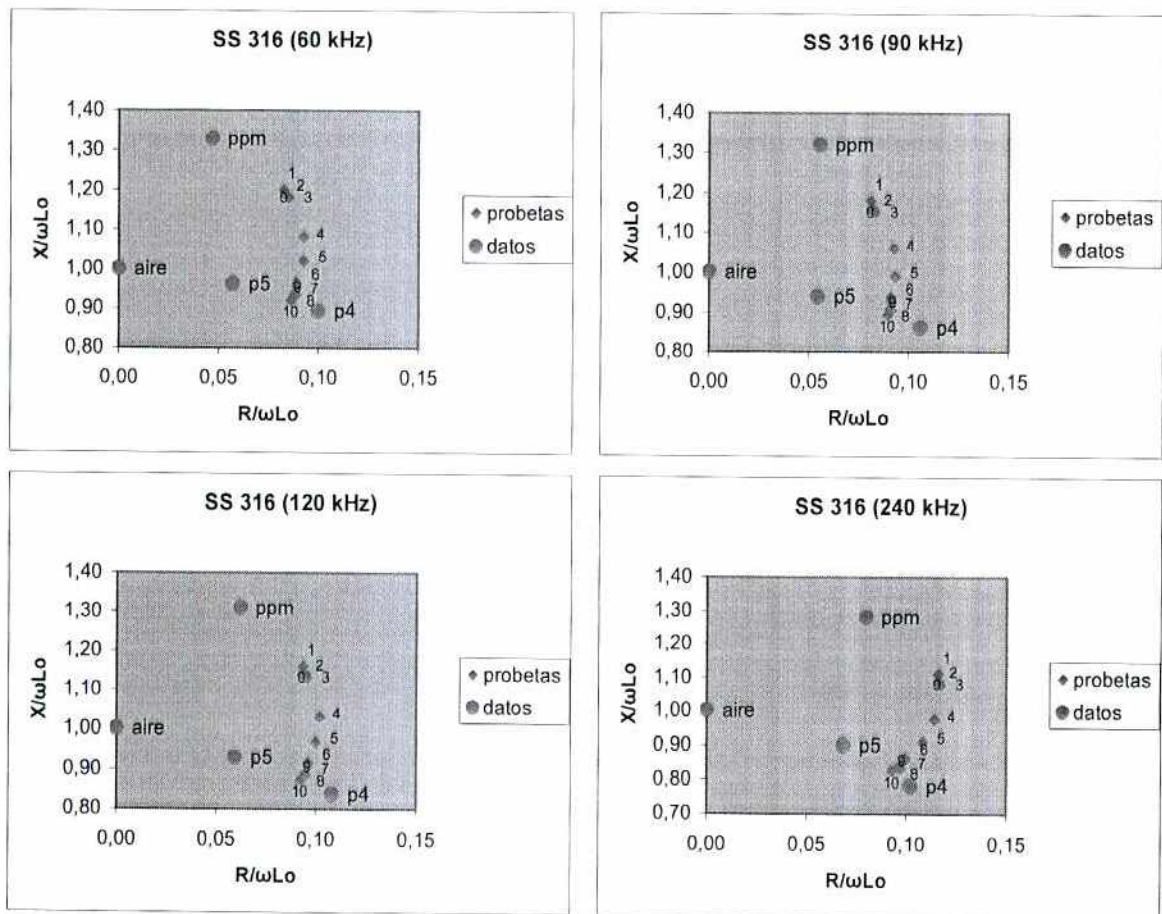


Figura 3.13
Representación en plano de impedancia: Serie AISI 316.

En la Figura 3.14 se representan los valores obtenidos de resistencia normalizada como función del número de probeta. A diferencia de lo mostrado con la serie SS 347, no hay dos niveles en los que se agrupan los valores.

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

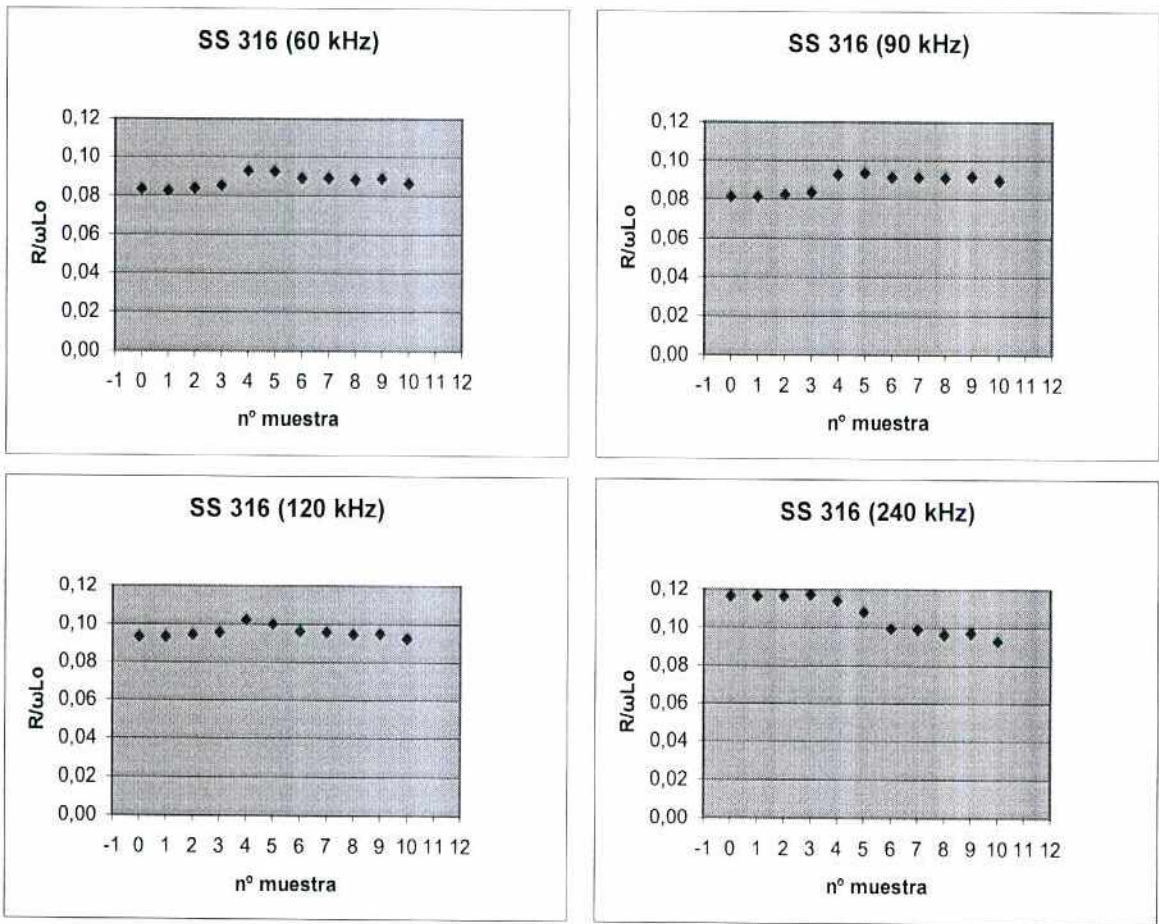


Figura 3.14
Resistencia normalizada para cada probeta de la serie AISI 316.

En la Figura 3.15 se representan los valores obtenidos de reactancia normalizada como función del número de probeta para la serie SS 316. En este caso sí se puede ver el patrón de comportamiento mencionado cuando se presentaron los resultados de la serie SS 347: un nivel alto observado en las muestras con mayor contenido de martensita (0 a 3); un nivel bajo para las muestras predominantemente austeníticas (6 a 10) y las muestras 4 y 5 que hacen la transición entre los dos niveles. En esta serie hay menor diferencia entre niveles.

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

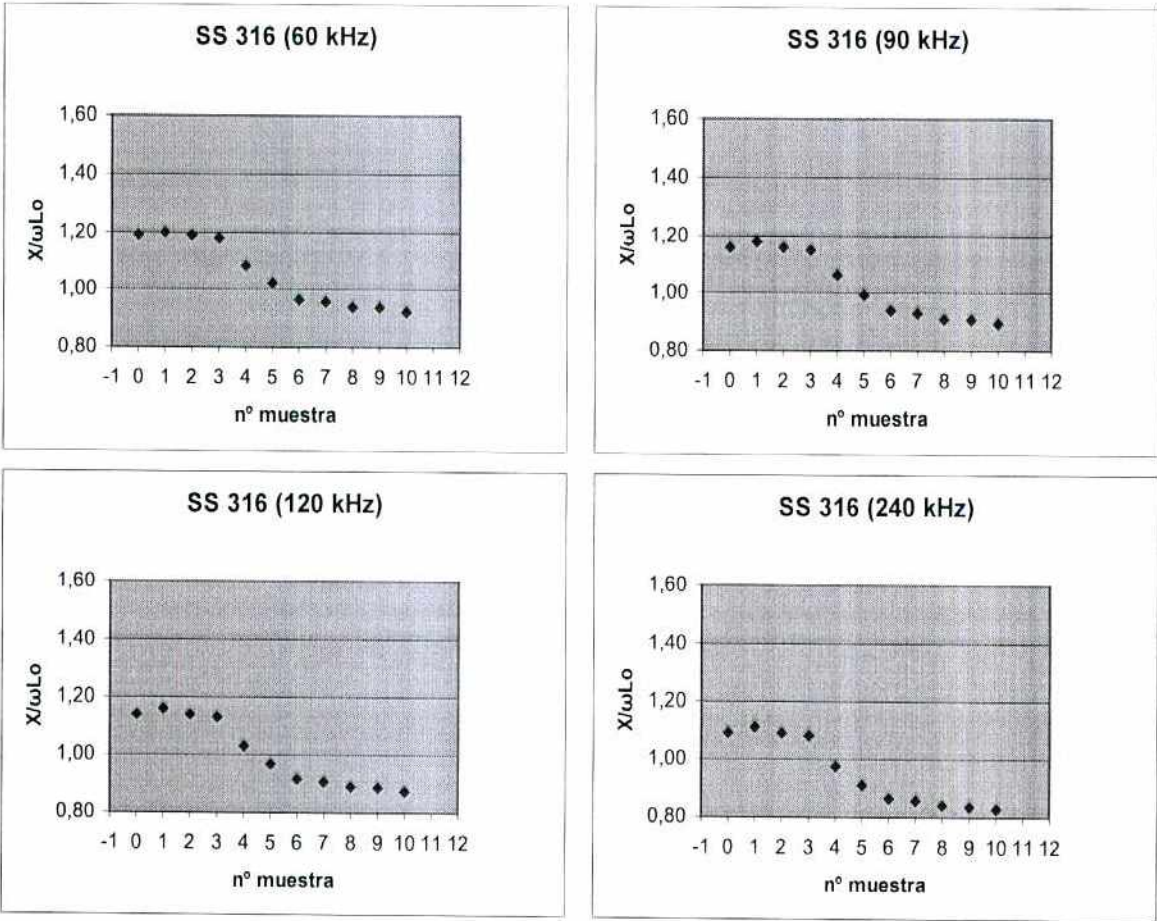


Figura 3.15
Reactancia normalizada para cada probeta de la serie AISI 316.

A continuación se representan, en las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18, los resultados obtenidos con la serie SS 304, de la misma forma que las anteriores series. Igual que las series SS 347 y SS 316, también esta serie mostró acuerdo con la forma de las curvas obtenidas teóricamente. Si se comparan estas figuras con las correspondientes a la serie SS 347 (Figuras 3.10, 3.11 y 3.12), se puede comprobar que el comportamiento de estas series es muy similar.

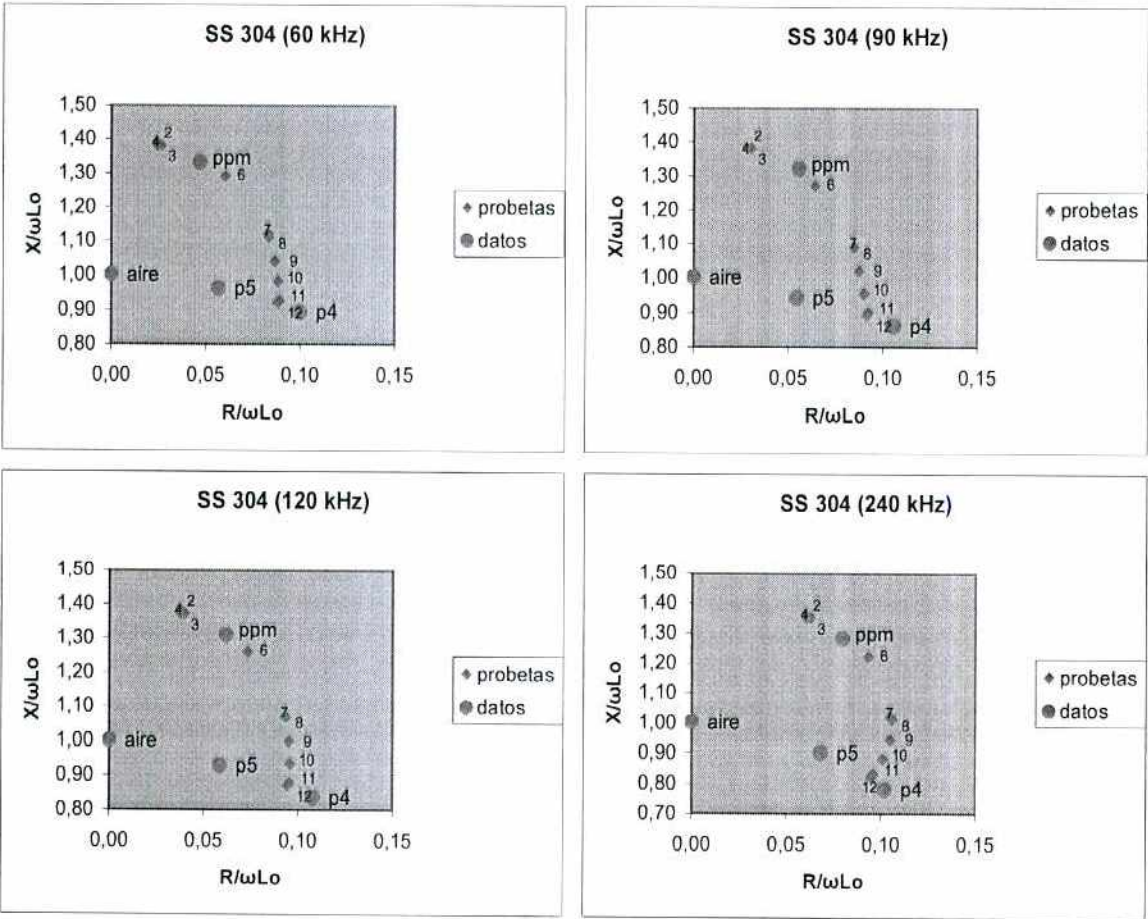


Figura 3.16
Representación en plano de impedancia: Serie AISI 304.

En la Figura 3.17, se puede ver la diferencia de valores de la resistencia normalizada existente entre las muestras predominantemente austeníticas y las predominantemente martensíticas. El nivel bajo, en este caso, corresponde a las muestras predominantemente martensíticas (2 a 4); y el nivel alto para las muestras predominantemente austeníticas (7 a 12). La muestra 6 se ubica en la transición entre los dos niveles.

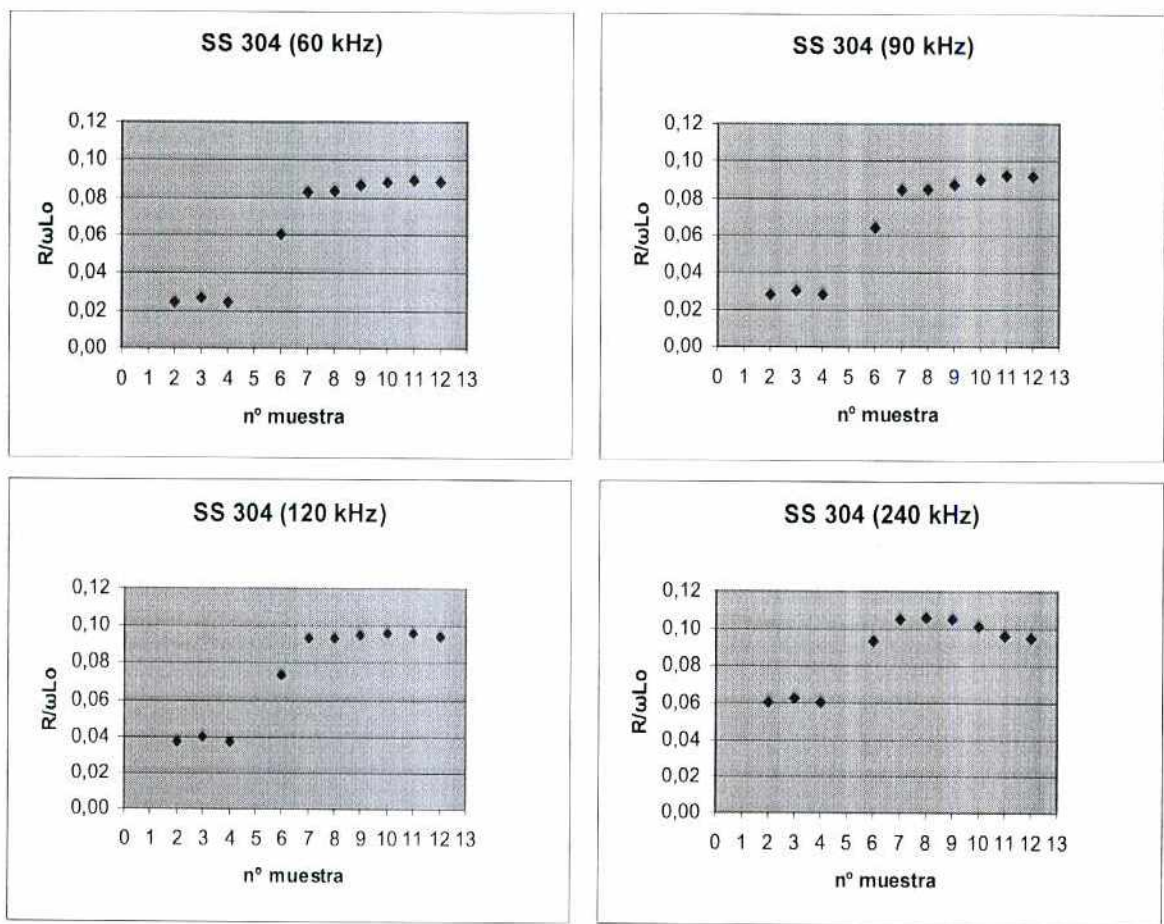


Figura 3.17
Resistencia normalizada para cada probeta de la serie AISI 304.

También en la Figura 3.18, correspondiente a la reactancia normalizada, se puede ver el patrón de comportamiento mencionado entre las muestras predominantemente austeníticas y las predominantemente martensíticas, sólo que en este caso el nivel alto (alrededor de 1,4) corresponde a las muestras predominantemente martensíticas y el nivel bajo a las predominantemente austeníticas. El nivel bajo, igual que con la serie SS 347, no está tan claramente definido como en el caso de la resistencia.

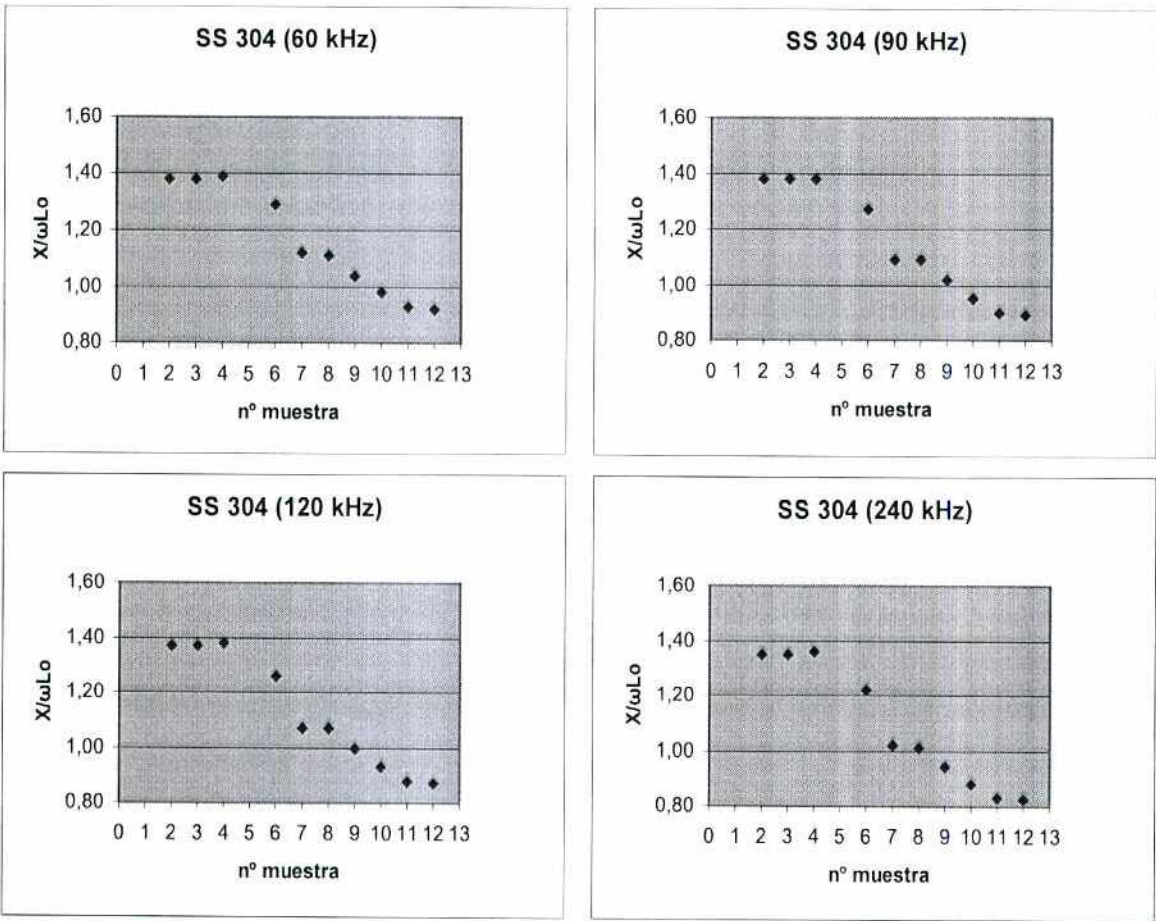


Figura 3.18
Reactancia normalizada para cada probeta de la serie AISI 304.

Por último, se representan en la Figura 3.19 los resultados obtenidos con una serie de 4 probetas, de las cuales no se tenía ninguna información previa, con la excepción del material de que estaban hechas (SS 304), las cuales se designan con los números del 13 al 16 y a la serie SS 304/2.

Se puede ver en la Figura 3.19 que la impedancia de la muestra 13 es muy similar a la del patrón de permeabilidad magnética, que las muestras 15 y 16 tienen una impedancia casi idéntica y que la muestra 14 presenta un valor intermedio.

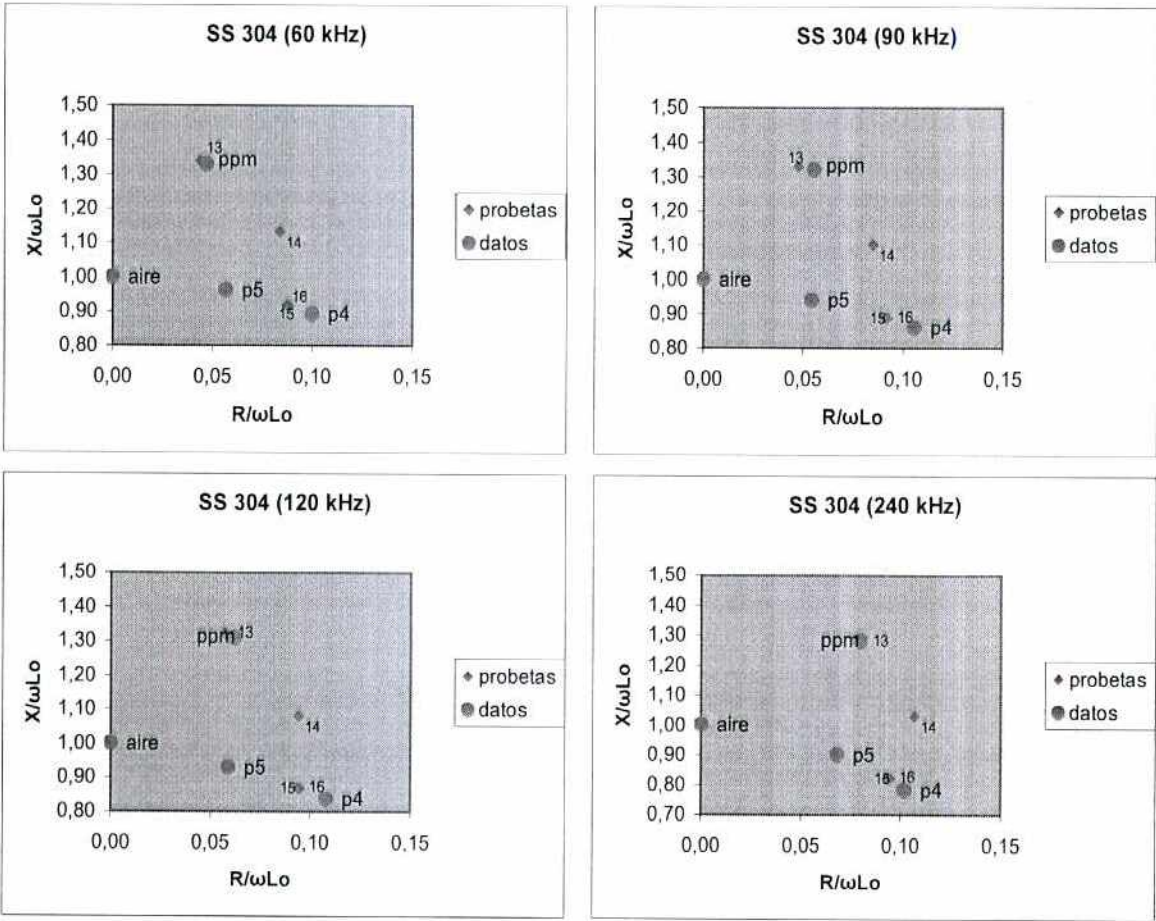


Figura 3.19
Representación en plano de impedancia: Serie AISI 304/2.

3.2.3 Cálculo de las propiedades electromagnéticas

3.2.3.1 Estimación de la conductividad eléctrica

Una vez transformadas las coordenadas de todos los puntos dato y puntos incógnita se pueden calcular las conductividades correspondientes a las muestras total o casi totalmente austeníticas, dado que se conoce que para ellas $\mu_r \approx 1$, mediante el procedimiento discutido en [58, 59]. Brevemente, si todas las variables, excepto la conductividad, están fijas, la ec. (47) puede expresarse sintéticamente como

(48)
$$Z_{nor} = f(\sigma)$$

Para calcular la conductividad a partir de esta ecuación, se optó por utilizar un método numérico para estimar el valor de dicha propiedad. Para un valor medido de impedancia de la sonda

acopiada a una muestra de conductividad desconocida (Z_0), el cálculo de dicha conductividad se reduce a encontrar numéricamente la solución de la ecuación (49)

$$(49) \quad f(\sigma) - Z_0 = 0$$

Dadas las características de la curva de conductividades (ver Figura 3.9) correspondiente a la frecuencia de trabajo y el rango de conductividades de los aceros estudiados, se puede construir una función $g(\sigma)$, localmente continua y estrictamente creciente, definida de la siguiente manera:

$$(50) \quad g(\sigma) = |f(\sigma) - j| \quad \sigma_{aire} \leq \sigma \leq \sigma_{p_4}$$

donde j es la unidad imaginaria, que corresponde en este caso a la impedancia normalizada de la sonda en aire. En estas circunstancias, un cero de la ec. (49) es un cero de la ec. (51) [63]

$$(51) \quad h(\sigma) = |f(\sigma) - j| - |Z_0 - j| = 0$$

Para resolver esta ecuación, se eligió el método de bisección que se basa en el teorema del valor intermedio para funciones continuas. Este teorema dice que si h es una función continua en el intervalo $[a, b]$ y se satisface la desigualdad $h(a) < z < h(b)$, entonces $h(\sigma)=z$ para algún $\sigma \in [a, b]$.

El método de bisección funciona de esta manera: si $h(a).h(b)<0$, entonces se calcula $c=\frac{1}{2}(a+b)$ y se determina si $h(a).h(c)<0$. Si lo es, entonces h tiene un cero en $[a, c]$, se renombra a c como b y se repite el proceso con un nuevo intervalo $[a, b]$, cuya longitud es igual a la mitad del intervalo original. Si $h(a).h(c)>0$ entonces $h(c).h(b)<0$, y en este caso se renombra a c como a . En cualquiera de los dos casos se genera un nuevo intervalo que contiene un cero de h , y el proceso puede repetirse. Si se diera el caso que $h(a).h(c)=0$, entonces se habría encontrado el cero de h en el intervalo considerado. Sin embargo esto es muy poco probable, debido a los errores por redondeo cometidos en un procesamiento por computadora. En consecuencia el proceso se repite hasta que se cumpla una de tres condiciones:

- se haya cumplido un número de pasos preestablecido
- $h(c)$ sea lo suficientemente pequeño
- $|b-a|$ sea lo suficientemente pequeño

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

En el programa que se escribió con el algoritmo de bisección (ver Apéndice IV) que corre bajo el software MATHEMATICA®, versión 2.2.3, de Wolfram Research, Inc. [50, 51], se optó por el último de estos criterios.

En este método la cota del error cometido al interrumpir el proceso en el paso n es, según [63],

$$(52) \quad |r - c_n| \leq \frac{1}{2} |b_n - a_n| \leq 2^{-(n+1)} (b_0 - a_0)$$

donde r es el cero buscado, a_0 y b_0 los valores del intervalo inicial y a_n , b_n y c_n los valores de a , b y c en el paso n .

3.2.3.2 Estimación de la permeabilidad magnética

Con un procedimiento similar al utilizado para el caso de la conductividad eléctrica, se puede estimar la permeabilidad magnética. Si todas las variables, excepto la permeabilidad magnética relativa, están fijas, la ec. (47) puede expresarse sintéticamente como

$$(53) \quad Z_{nor} = f(\mu_r)$$

Para un valor medido de impedancia de la sonda acoplada a una muestra de permeabilidad magnética relativa desconocida (Z_0), el cálculo de la μ_r correspondiente se reduce a encontrar numéricamente la solución de la ecuación

$$(54) \quad f(\mu_r) - Z_0 = 0$$

Suponiendo que la conductividad eléctrica permanece constante, aunque varíe el contenido de martensita de las muestras (ver curva verde en Figura 3.9) y sin apartarse de las hipótesis del problema, se puede, en este caso, construir una función $g(\mu_r)$ que sea, localmente, continua y estrictamente creciente, definida de la siguiente manera:

$$(55) \quad g(\mu_r) = |f(\mu_r) - Z(\sigma_0)| \quad 1 \leq \mu_r \leq \mu_{r_{ppm}}$$

donde $Z(\sigma_0)$ es la impedancia de la muestra de la serie con contenido de martensita nulo o casi nulo, es decir con $\mu_r \approx 1$, y σ_0 es su conductividad eléctrica (punto 11 en la Figura 3.9). En estas circunstancias, ahora hay que encontrar un cero de la ec. (56) [63]

$$(56) \quad h(\mu_r) = |f(\mu_r) - Z(\sigma_0)| - |Z_0 - Z(\sigma_0)| = 0$$

Para resolver esta ecuación también se eligió el método de bisección. El programa que se escribió para esto se puede ver en el Apéndice V, corre bajo el software MATHEMATICA®, versión 2.2.3, de Wolfram Research, Inc. [50, 51].

3.2.3.3 Resultados

Como se mencionó en el comienzo de la sección 3.2.3, a partir de los ensayos de corrientes inducidas, y con sus resultados transformados al plano de impedancia compleja normalizada, se puede calcular la conductividad eléctrica (σ) de las muestras totalmente austeníticas.

Los valores de impedancia compleja dependen funcionalmente del producto de la frecuencia (f), μ_r y σ . Al invertir el modelo para el cálculo de μ_r , se supuso un valor de σ y se eligió una f determinada. Dado que para un material conductor y magnético ($\mu_r > 1$), la principal causa de los cambios de impedancia, para una sonda y geometría del material dados, es la permeabilidad magnética [64], se utilizó el valor de σ correspondiente a las probetas puramente austeníticas, suponiendo que dicha propiedad no varía significativamente con la aparición de proporciones no demasiado grandes de una segunda fase, en este caso la martensita.

En la sección anterior se expuso cómo, en forma parecida a lo realizado con σ , se puede calcular la permeabilidad magnética relativa (μ_r) para estos materiales. Con estos procedimientos, y utilizando los programas presentados en los apéndices IV y V, se calcularon σ y μ_r para las distintas probetas de las tres series de aceros inoxidables estudiadas, y se exponen en la Tabla 3.4.

La Tabla 3.4, correspondiente a las probetas de la serie SS 347, tiene dos partes. En la primera parte, la primera fila corresponde a la frecuencia de ensayo y la otra a la conductividad eléctrica calculada para este acero; la segunda parte tiene en la primera columna la designación de cada probeta y en las restantes columnas, la permeabilidad magnética relativa calculada para cada frecuencia. Los errores del procedimiento, cometidos durante la determinación de las propiedades electromagnéticas, fueron calculados en un trabajo anterior [58] y no exceden el 12% para el rango

3.2 Ensayos no destructivos por corrientes inducidas

de conductividad eléctrica de los materiales estudiados y las frecuencias seleccionadas en estos ensayos.

Tabla 3.4

Propiedades electromagnéticas (σ , μ_r) calculadas para las probetas de la serie AISI 347.

f [kHz]	60	90	120	240
σ [S/m]	$1,4 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$
Id	μ_r	μ_r	μ_r	μ_r
0	9700	9700	9700	4800
1	9700	9700	9700	9700
2	9700	9700	9700	5200
3	9700	9700	9700	3900
4	150	150	150	130
5	27	29	27	29
6	6	6,8	7,4	7,4
7	5,1	5,7	6	6,3
8	2,1	2,3	2,3	2,4
9	2	2,1	2,3	2,3
11	1	1,1	1,1	1,2

La conductividad calculada para este material concuerda con la hallada en la bibliografía [56]. Las probetas 4 a 9 y 11 tienen valores de μ_r inferiores que el PPM y, prácticamente, no cambian para las distintas frecuencias ensayadas. Las probetas 0 a 3 tienen valores de μ_r superiores al PPM, por lo que se ubican en una zona del diagrama de impedancias, en que un ensayo de corrientes inducidas tiene baja sensibilidad, por lo que los valores de μ_r calculados podrían estar lejos de los reales, lo cual se aprecia por la diferencia entre los resultados obtenidos para las distintas frecuencias.

Las Tablas 3.5 y 3.6 son similares a la Tabla 3.4, pero corresponden a la serie SS 304 y la serie SS 316, respectivamente.

En la serie SS 304 sucede algo similar a la serie SS 347: conductividad calculada en concordancia con la hallada en la bibliografía [56], un grupo de probetas (6 a 11) con valores de μ_r que el PPM, y otro grupo de probetas (2 a 4) con valores de μ_r superiores al PPM, por lo que los valores de μ_r calculados podrían estar lejos de los reales.

En la serie SS 316 también se cumple que la conductividad calculada está en concordancia con la hallada en la bibliografía [56], pero, todas las probetas tienen valores de μ_r inferiores que el PPM,

Tabla 3.5Propiedades electromagnéticas (σ , μ_r) calculadas para las probetas de la serie AISI 304.

f [kHz]	60	90	120	240
σ [S/m]	$1,3 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$
Id	μ_r	μ_r	μ_r	μ_r
2	5800	4500	2900	1300
3	3900	3300	2100	1100
4	9700	9100	4200	1400
6	57	57	57	57
7	5,1	5,7	6	6,3
8	4,8	5,4	5,4	5,7
9	2,6	2,8	2,9	3,1
10	1,6	1,6	1,6	1,7
11	1	1	1	1,1
12	1	1	1,1	1,2

Tabla 3.6Propiedades electromagnéticas (σ , μ_r) calculadas para las probetas de la serie AISI 316 [53].

f [kHz]	60	90	120	240
σ [S/m]	$1,3 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$
Id	μ_r	μ_r	μ_r	μ_r
0	11	12	12	12
1	14	14	14	14
2	11	12	12	12
3	9,8	10	10	10
4	3,6	3,9	3,9	3,9
5	2	2,1	2,1	2,1
6	1,3	1,3	1,3	1,3
7	1,3	1,3	1,3	1,3
8	1,1	1,1	1,1	1,1
9	1,1	1	1	1,1
10	1	1,1	1,1	1,2

CAPITULO IV

Ensayos complementarios

4.1 Ensayos de Difracción de Rayos X

Los rayos X son una radiación electromagnética de longitud de onda del orden de 0,1 nm, distancia comparable con el diámetro de un átomo. Ocupan la porción del espectro electromagnético situada entre los rayos gamma y los ultravioletas. El descubrimiento de los rayos X en 1895 permitió a los científicos estudiar la estructura cristalina de los materiales en el nivel atómico. La difracción de rayos X se ha utilizado en dos áreas principales: la caracterización de materiales cristalinos y la determinación de su estructura. Cada sólido cristalino tiene un único patrón característico de rayos X, que se puede utilizar como una "huella digital" para su identificación. Una vez que se haya identificado el material, la cristalografía de rayos X se puede utilizar para determinar su estructura, por ejemplo, cómo los átomos se ubican en la red cristalina, cuál es la distancia interatómica, etc. [65, 66].

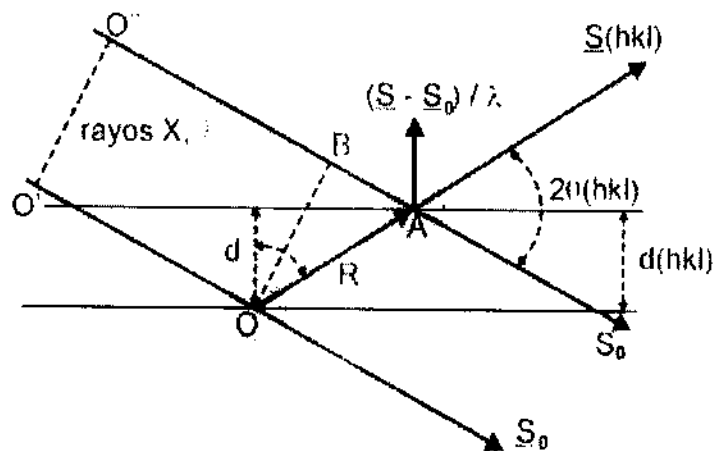


Figura 4.1

Descripción geométrica de la dirección del máximo de difracción debido a la interferencia constructiva entre los átomos de los planos de espaciado $d(hkl)$ [67]

Cuando una sustancia cristalina es sometida a un haz de rayos X que incide según un ángulo determinado θ , los diferentes planos o capas de átomos de los cristales reflejan parte de la radiación, siendo el ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia. Para que las ondas reflejadas por los diferentes planos cristalinos estén en fase, es decir, de modo que la intensidad de radiación reflejada sea máxima, es necesario, de acuerdo con la ley de Bragg, que

$$n\lambda = 2d \sin \theta ,$$

donde n es un número entero, λ la longitud de onda de la radiación y d es la distancia entre los planos de los cristales (Figura 4.1).

El experimento de la difracción de rayos X requiere básicamente de una fuente de rayos X, la muestra bajo investigación y un sistema de detección y conteo de los rayos X difractados. La Figura 4.2 es un diagrama esquemático de un difractómetro de rayos X.

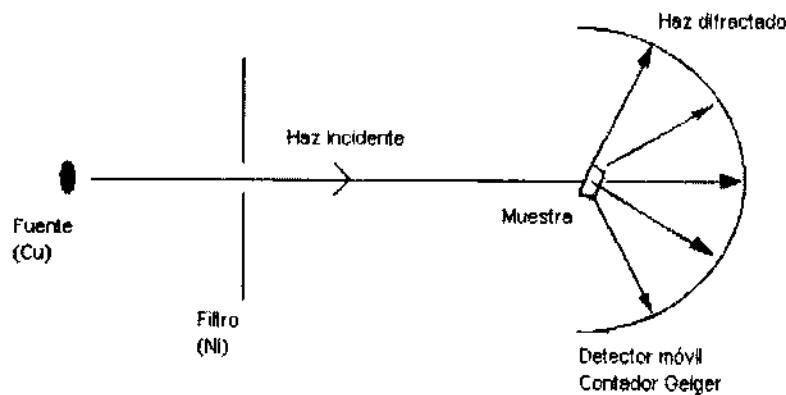


Figura 4.2
Diagrama esquemático de un difractómetro de rayos X

La radiación X más comúnmente usada es la emitida por el cobre, cuya longitud de onda característica para la radiación K_α es de 0,15418 nm. Cuando el haz incidente interactúa con una muestra pulverizada, la difracción ocurre en cada orientación posible de 2θ . El haz difractado puede ser detectado usando un detector móvil, tal como un contador Geiger, que está conectado con un registrador. En uso normal, el contador se programa para explorar en un rango de valores 2θ , moviéndose con una velocidad angular constante. Si se utilizan muestras masivas y con más de una fase, es necesario tener en cuenta factores como la textura y otras deformaciones de la red, que afectan los espaciados interplanares y la relación de intensidad entre los picos, que se aleja de la teórica.

En este trabajo, para realizar estos ensayos se utilizó un difractómetro Philips X'Pert PW3710 con radiación Cu K_α . La información obtenida corresponde a un volumen de la muestra determinado por la superficie de la misma y la profundidad de penetración de los Rayos X [53, 68].

El orden de magnitud de la profundidad accesible con la longitud de onda seleccionada, se puede calcular con la intensidad de rayos dispersados por la capa superficial de espesor t , entonces:

$$\frac{I_t}{I_\infty} = 1 - \exp\left(-\frac{2\mu t}{\sin \theta}\right)$$

4.1 Ensayos de Difracción de Rayos X

donde I_∞ es la intensidad de los rayos X dispersados por una capa de espesor infinito, μ es el coeficiente másico de absorción del material y θ es el ángulo de Bragg.

El coeficiente de absorción de la muestra $\mu(x)$, a la profundidad x , junto con la densidad $\delta(x)$, a la profundidad x , pueden ser calculados como funciones de x [69]. En general:

$$\mu(x) = \sum_{i=1}^p C_i(x) \mu_i \quad \text{y} \quad \delta(x) = \sum_{i=1}^p C_i(x) \delta_i$$

donde p es el número de fases presentes en la muestra, $C_i(x)$ es la proporción en masa de la i -ésima fase, μ_i es el coeficiente de atenuación de la i -ésima fase, δ_i es la densidad de la i -ésima fase. Sin embargo, $\mu(x)$ y $\delta(x)$ pueden considerarse constantes, en los siguientes procesos:

1. difusión de elementos livianos en una matriz de elementos pesados (por ejemplo, difusión de hidrógeno, nitrógeno o carbono)
2. interdifusión de elementos con aproximadamente igual densidad y absorción de rayos X
3. transformaciones de fase inducidas en la capa superficial por cualquier clase de cambios que no sean químicos (en el caso en estudio, la transformación martensítica)

La densidad δ_k y el coeficiente másico de absorción (constante) μ_k/δ_k , para el acero k , se calcularon a partir de:

$$\delta_k = \sum_{j=1}^q f_j \delta_j \quad \text{y} \quad \frac{\mu_k}{\delta_k} = \sum_{j=1}^q f_j \left(\frac{\mu_j}{\delta_j} \right)$$

donde q es el número de elementos que componen el acero, f_j es la fracción del j -ésimo elemento en el acero y μ_j/δ_j es el coeficiente másico de absorción (depende de varios tipos de elementos y radiaciones) [70].

A partir de los porcentajes en peso aproximados de cada aleación (ver Tabla 3.1) y los datos de la Tabla 4.1, se calculan el coeficiente másico de absorción y la densidad aproximados para cada aleación (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.1
Propiedades utilizadas de los componentes principales de los aceros estudiados

	Cromo	Níquel	Hierro
Coeficiente másico de absorción [cm ² /g] [70]	252.3	48.83	304.4
Densidad [g/cm ³] [71]	7.19	8.90	7.86

Tabla 4.2

Propiedades calculadas de los aceros estudiados

	347	304	316
Coefficiente másico de absorción [cm ² /g]	262,8 ± 0,1	262,6 ± 0,1	255,1 ± 0,1
Densidad [g/cm ³]	7,7 ± 0,1	7,7 ± 0,1	7,6 ± 0,1

Con todos estos elementos se puede calcular la profundidad de penetración. Dado que la intensidad del haz incidente decrece en forma exponencial con la distancia a la superficie, se da la profundidad de penetración en función de un porcentaje de la intensidad difractada. En la Tabla 4.3 están los resultados correspondientes de la profundidad de penetración de cada acero, para los ángulos $2\theta = 60^\circ$ y $2\theta = 95^\circ$, suponiendo que un 90% de la intensidad difractada proviene de dicha profundidad [68].

Tabla 4.3

Profundidad de penetración de los rayos X en los aceros estudiados

x [μm]	347	304	316
$2\theta = 60^\circ$	2,9 ± 0,1	2,9 ± 0,1	3 ± 0,1
$2\theta = 95^\circ$	4,2 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,4 ± 0,1
media	3,5 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,7 ± 0,1

4.1.1 Análisis de los diagramas

El ajuste del diagrama experimental se realizó mediante diagramas simulados por el programa PowderCell [72].

Los diagramas completos fueron analizados para identificar las fases presentes y los parámetros de red de las mismas. En todos los casos se observan los picos correspondientes a la martensita α' (bcc), austenita γ (fcc) y picos de baja intensidad, correspondientes a carburos de Nb y a otra u otras fases cuya proporción es ínfima en comparación con las dos fases mencionadas en primer término (Figura 4.4).

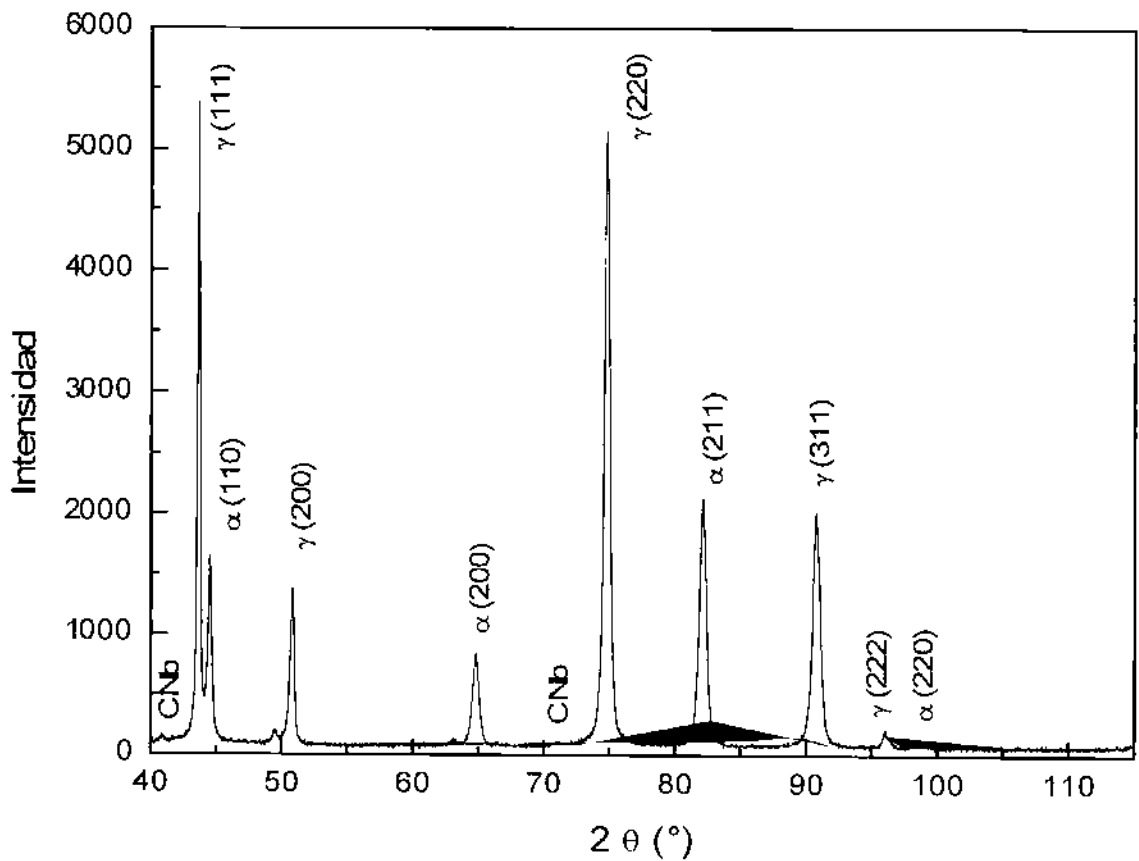


Figura 4.4
Difractograma correspondiente a la muestra 347-6.

Dado que las muestras analizadas eran masivas, se observó la presencia de textura cristalográfica (las intensidades relativas de los picos de difracción difieren de las correspondientes a una muestra de polvo con orientaciones al azar), debido al tipo de trabajado mecánico a que fueron sometidas. Para determinar el porcentaje en peso de la austenita en las distintas muestras, minimizando el error asociado debido a la presencia de textura cristalográfica, se utilizó el método propuesto en la referencia [73]. Mediante el programa PowderCell [72], se ajustó, para cada muestra, el diagrama experimental en las zonas correspondientes a los picos (ver Figura 4.5):

1. $220\gamma - 200\alpha'$,
2. $220\gamma - 211\alpha'$,
3. $311\gamma - 200\alpha'$,
4. $311\gamma - 211\alpha'$.

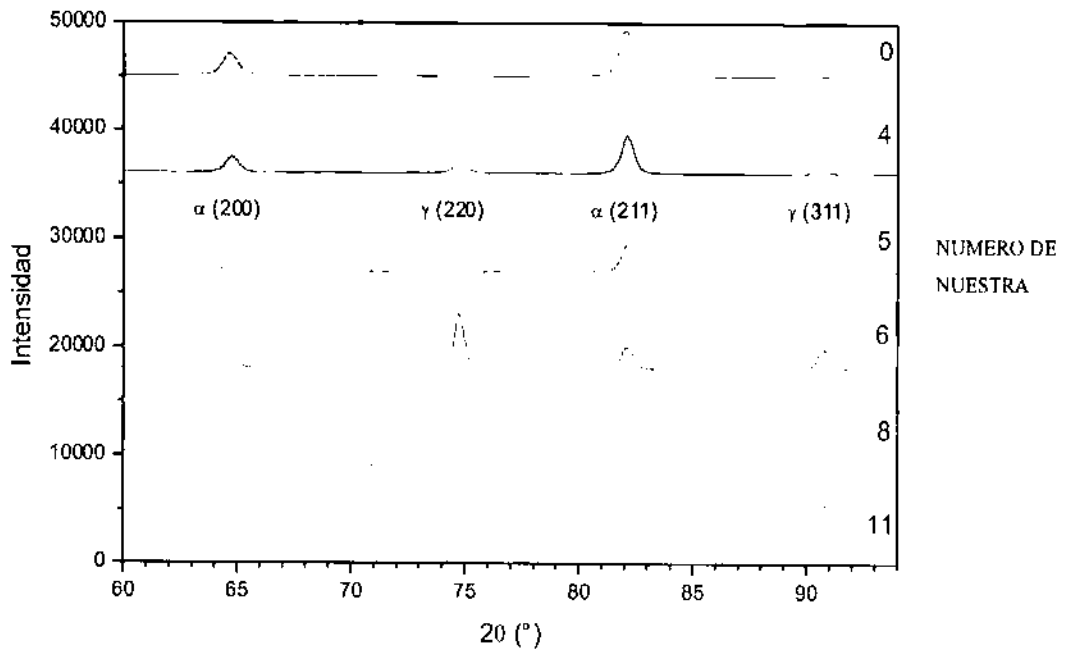


Figura 4.5
Zona de los diagramas de difracción utilizada
para la determinación del porcentaje en peso de austenita (SS 347).

Para cada una de estas regiones se obtuvo el porcentaje en peso de austenita (en una muestra sin textura, los valores calculados para las cuatro zonas del espectro deberían coincidir, hecho que no ocurre en las correspondientes a este trabajo) y luego se calculó el promedio de las cuatro zonas. Los porcentajes calculados sólo tienen en cuenta la presencia de las fases γ y α' , es decir, se supuso que $\% \gamma + \% \alpha' = 100$.

4.1.2 Resultados

Los resultados obtenidos con el ensayo de difracción de rayos X se encuentran en el apéndice VII. En la Figura 4.6 se representan gráficamente dichos resultados. Se puede observar comportamientos similares en las series SS 347 y SS 304, en cuanto a presentar contenidos de martensita superiores al 90 %.

La serie SS 347 muestra el comportamiento descrito durante la presentación de los resultados obtenidos en los ensayos por corrientes inducidas: las muestras designadas del 0 a 3 con un contenido muy alto de martensita (casi 100%), las muestras 6 a 9 y 11 con un contenido menor del 40 % y las muestras 4 y 5 (las de transición) con un contenido intermedio.

En la serie SS 304, se puede ver la diferencia existente entre el contenido de α' de las muestras predominantemente austeníticas y el de las predominantemente martensíticas. El nivel alto corresponde a las muestras predominantemente martensíticas (2 a 4); y el nivel bajo a las muestras

predominantemente austeníticas (7 a 12). La muestra 6 se ubica en la transición entre los dos niveles.

La serie SS 316 presenta muy pequeños porcentajes de contenido de martensita no superando el 20% en ninguno de sus ejemplares [53].

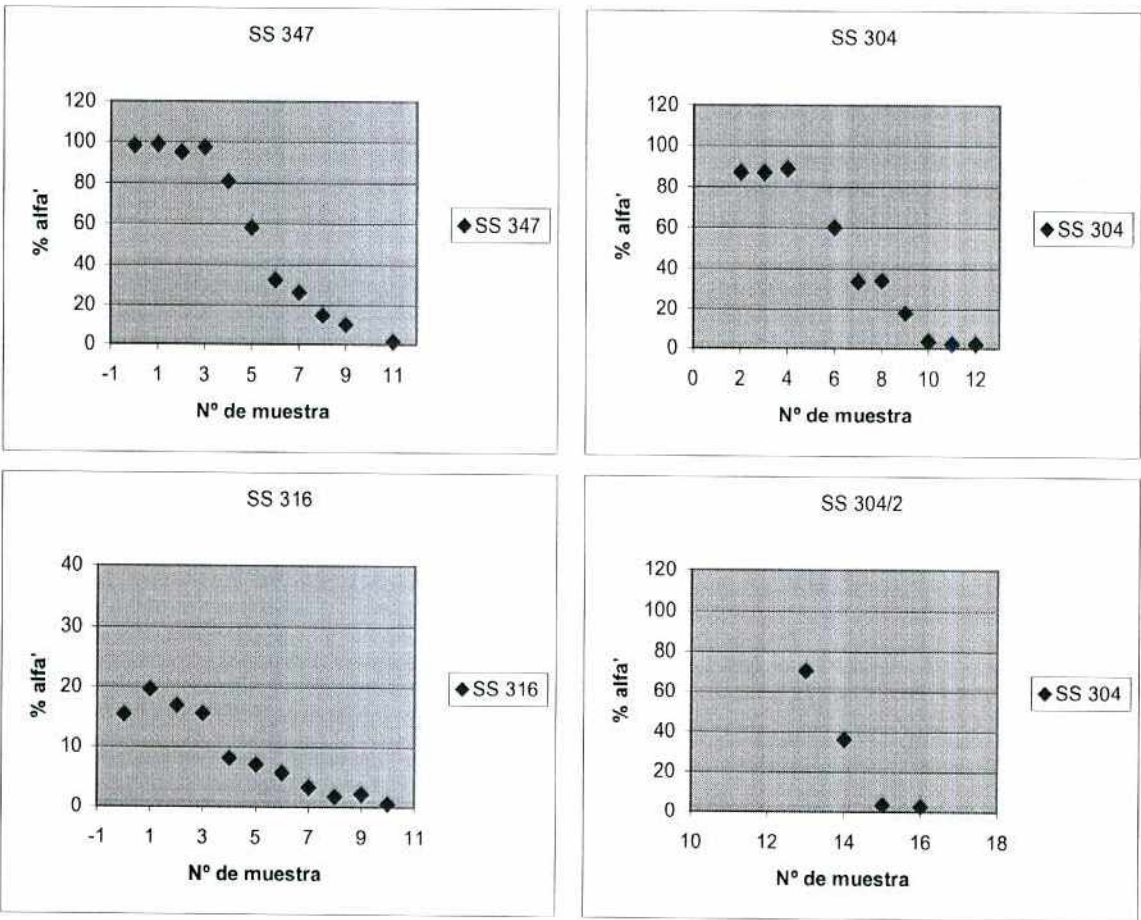


Figura 4.6
Proporción de martensita determinado por Rayos X
según número de probeta para todas las series.

Estos resultados se utilizarán más adelante, en todas las secciones del siguiente capítulo, para compararlos con los resultados obtenidos con los ensayos de corrientes inducidas.

4.2 Ensayos con el equipo 3MA

En el Departamento de Materiales del Instituto Fraunhofer de Ensayos no Destructivos, de la ciudad de Saarbrücken, República de Alemania, se ensayó la serie de probetas AISI 347, con el equipo 3MA ((Micromagnetic Multi-Parameter Microstructure and Stress Analysis)) [74], el cual se puede ver en la Figura 4.7. Este equipo, entre otras aplicaciones, se utiliza para la:

- Inspección de partes y componentes tratados térmicamente
- inspección de soldaduras

El instrumento 3MA tiene un sistema modular, el cual utiliza información derivada de cuatro diferentes magnitudes físicas:

- corrientes inducidas,
- ruido Barkhausen,
- variación temporal de la intensidad del campo magnético tangencial
- permeabilidad incremental.

Todos estas magnitudes se ensayan en simultáneo, y las señales se procesan digitalmente con PC.

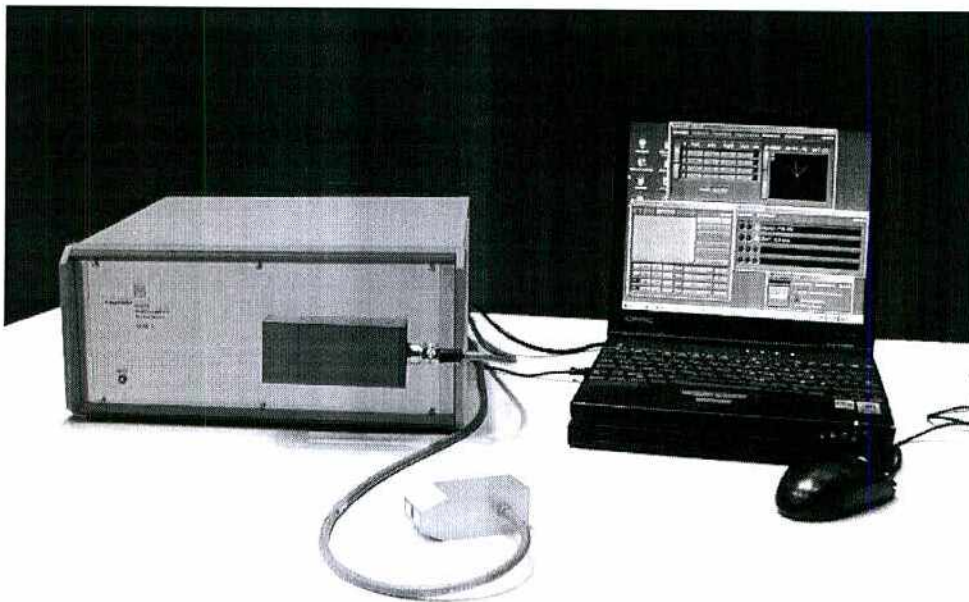


Figura 4.7
Equipo 3MA

En esta investigación, los ensayos realizados con este equipo permitieron determinar el comportamiento ferromagnético de algunas de las probetas de la serie SS 347, específicamente, ruido Barkhausen y permeabilidad incremental, dado que estas técnicas tienen su aplicación restringida a materiales ferromagnéticos [75].

4.2.1 Medidas de Ruido Barkhausen

La densidad de flujo magnético en un material ferromagnético, sujeto a un campo magnético variable, no varía en forma continua, lo hace en incrementos pequeños, abruptos y discontinuos, conocidos como saltos Barkhausen [66]. La Figura 4.8 muestra un ciclo de histéresis para un material magnético donde B es la densidad de flujo magnético y H es la intensidad del campo magnético variable aplicado.

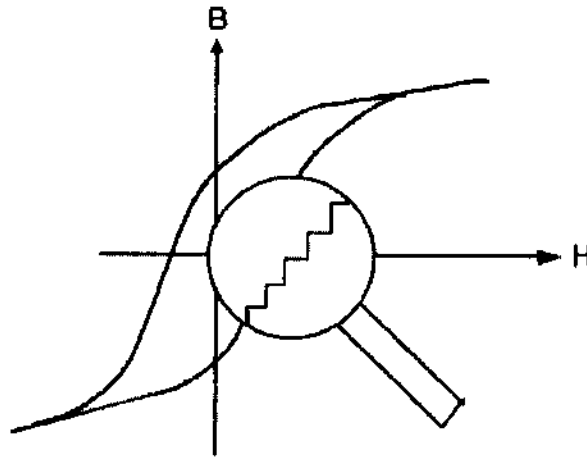


Figura 4.8
Ciclo de histéresis para un material magnético
mostrando las discontinuidades que producen el ruido Barkhausen

Los materiales ferromagnéticos, incluso en un estado de desmagnetización llamado estado virgen, consisten de pequeñas regiones formadas por un grupo de átomos que actúan como un pequeño imán, llamadas dominios. El grupo de átomos en una pequeña región forma un pequeño imán, porque las interacciones moleculares causan momentos magnéticos que hacen que los átomos se alineen en paralelo unos con otros. En otras palabras, cada dominio es magnetizado espontáneamente a la saturación, incluso en ausencia de un campo magnético externo. Debido a que las direcciones de magnetización en diferentes dominios no son necesariamente paralelas entre sí, la densidad de flujo magnético resultante puede ser cero. Cuando la muestra se coloca en un campo magnético, la densidad de flujo magnético resultante puede ser cambiada por dos mecanismos diferentes. El primero es el movimiento de una pared de dominio, y el segundo es la rotación de los vectores de magnetización en los dominios, en la dirección del campo aplicado, este último para grandes valores del campo aplicado. El proceso de magnetización consiste, entonces, en la conversión de un estado de múltiples dominios, en uno de un solo dominio magnetizado en la misma dirección que el campo aplicado. Este proceso no es continuo, sino gradual, debido al movimiento de las paredes de los dominios, también llamados saltos. Estos suceden en forma

discontinua porque las paredes están temporalmente inmovilizadas por obstáculos microestructurales, tales como dislocaciones, precipitados o bordes de fase o grano en un material policristalino. La separación gradual de la pared del obstáculo cambia localmente el estado de magnetización, produciendo un pulso eléctrico llamado ruido Barkhausen (BN) [75, 76].

El BN se recibe por:

- bobinas ubicadas en la superficie o, a veces, cercanas a la muestra.
- transductores piezoeléctricos acoplados a la superficie de la probeta o
- el cabezal de un grabador de cinta.

en forma de pulsos de tensión eléctrica inducida. Después de unas etapas de preamplificación, filtrado de paso-banda, rectificación, amplificación final y filtrado de paso-bajo, a fin de recibir el contenido de alta frecuencia del ruido, se obtiene la curva de la amplitud del BN (M) en función de la intensidad del campo magnético tangencial (H_t). La resolución espacial es limitada por el sensor y la profundidad de análisis por la menor frecuencia de corte del filtro pasa-banda [75].

Un ejemplo esquemático de un aparato de medición de BN se muestra en la Figura 4.9. Se aplica un campo magnético alterno a la muestra por el yugo en forma de U, y la bobina sensora detecta el BN. La información aplicable a ensayos no destructivos es el valor eficaz de los pulsos medidos por la bobina sensora [77].

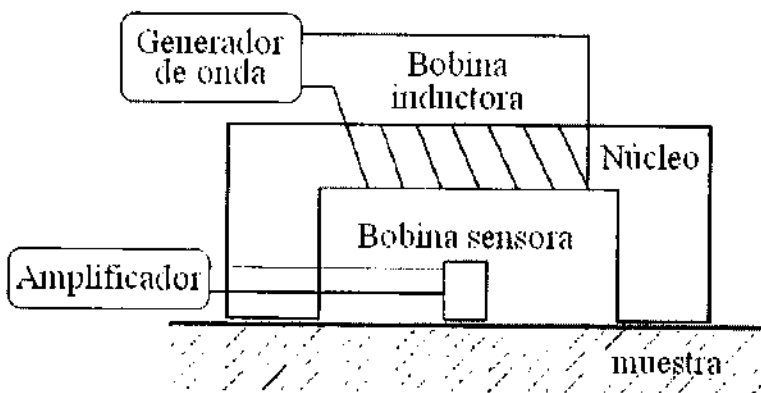


Figura 4.9
Esquema de un dispositivo para medir ruido Barkhausen

El BN ha sido estudiado ampliamente como una potencial herramienta para la evaluación no destructiva, en metalurgia de materiales ferromagnéticos, de la microestructura y los parámetros mecánicos. El BN es sensible al tamaño de grano y a la composición. También, los parámetros mecánicos tales como dureza, tensión residual y fatiga tienen influencia en la actividad Barkhausen [78, 79, 80, 81, 82]. BN es sensible a los defectos en las cercanías de la superficie, los cuales no siempre reflejan la degradación en el centro de los materiales [77].

4.2.1.1 Resultados

Los ensayos con el equipo 3MA sólo se pudieron realizar con la serie SS 347, por motivos que no son técnicos. En las Figuras 4.10 y 4.11 se representan gráficamente los resultados obtenidos con este equipo, en lo que se refiere al ensayo de Ruido Barkhausen.

En la Figura 4.10 se representa la amplitud del BN (M) en función de la intensidad del campo magnético tangencial (H_t), donde se observa un comportamiento típico de un material ferromagnético en las curvas correspondientes a las muestras 0 a 3. Esto se evidencia por los picos que éstas presentan. También tiene un comportamiento de este tipo, aunque en una escala mucho menor, la muestra 4. El resto de las muestras casi no presentan señal, lo cual indica que su comportamiento no es el correspondiente a un material ferromagnético.

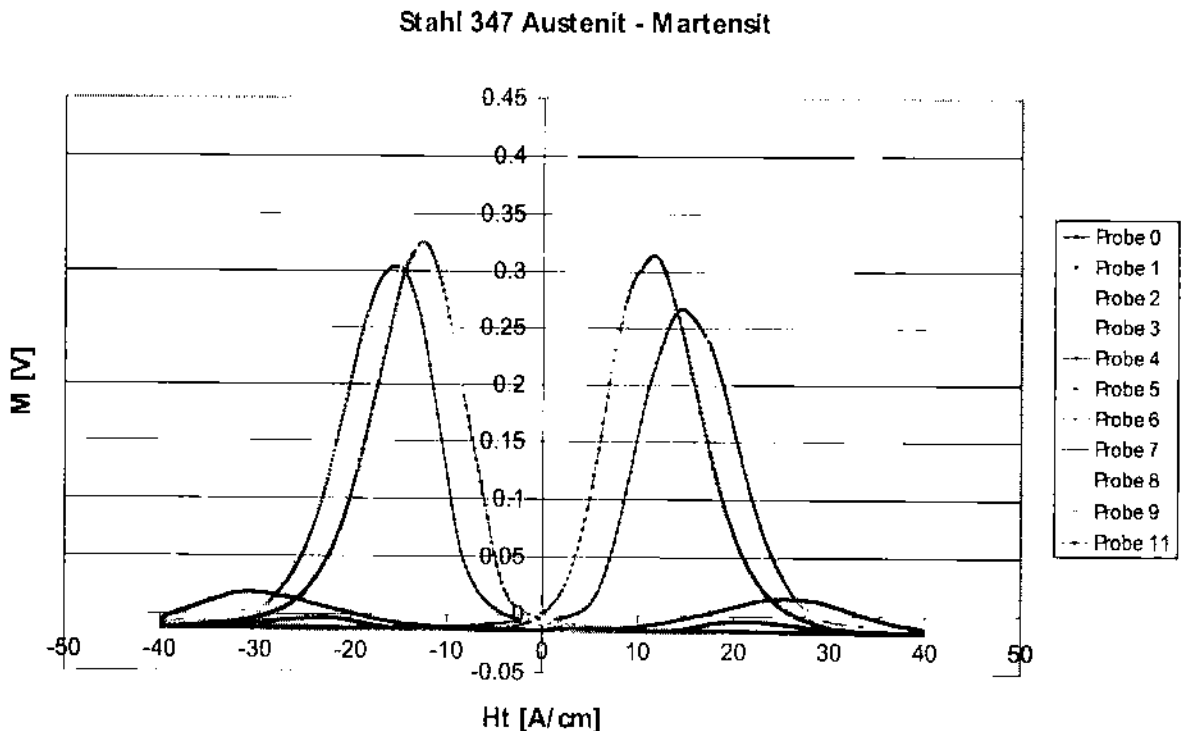


Figura 4.10
Amplitud de ruido Barkhausen vs. Intensidad de campo magnético tangencial.
Serie AISI 347.

En la Figura 4.11 se representan los máximos de las curvas de la amplitud del BN (curvas trazadas en la Figura 4.10) en función del número de probeta. Acá también se observa lo descrito en el párrafo anterior. Los valores negativos de la amplitud del BN se deben a errores en la calibración del instrumento.

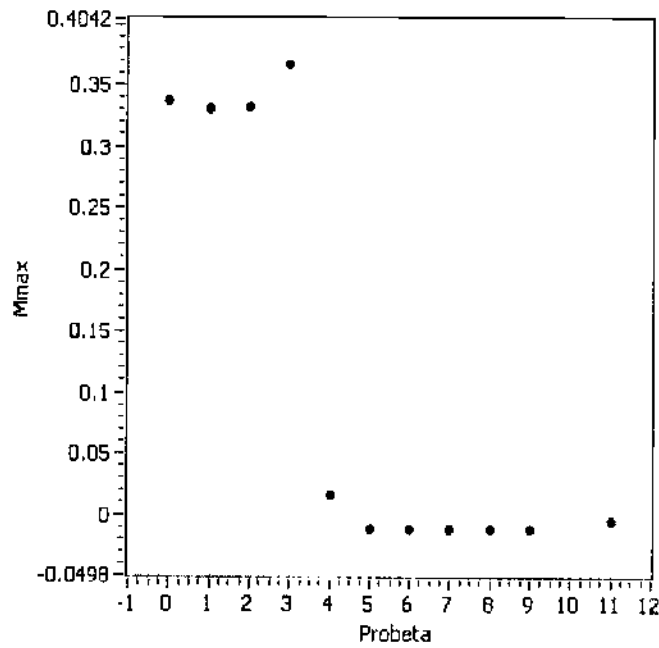


Figura 4.11
Máximo de la amplitud del BN [Volt]: Serie AISI 347.

4.2.2 Permeabilidad incremental

Se ha comprobado que las diferentes formas de un lazo de histéresis (ver Figura 4.12) pueden interpretarse en términos de propiedades o características del material, tales como, microestructura, deformación plástica, tensiones residuales y mecanismos de dureza [83. 84]. Uno de los métodos que provee información acerca de la forma de los lazos de histéresis es un ensayo de permeabilidad incremental.

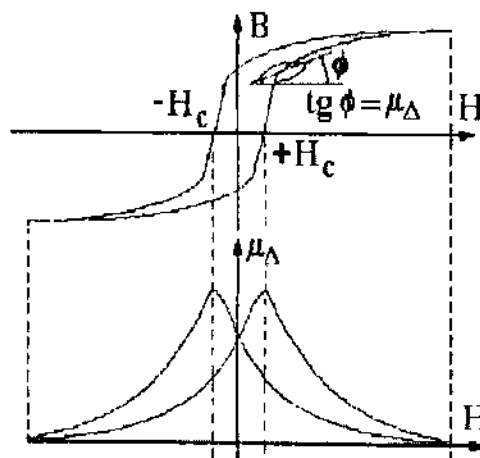


Figura 4.12
Representación de un ciclo de histéresis con las cantidades que definen la permeabilidad incremental [84]

El valor de la permeabilidad incremental es una de las características más importantes del material, ya que determina la inductancia en el caso de inductores por los que circulan corrientes continua y alterna superpuestas [83].

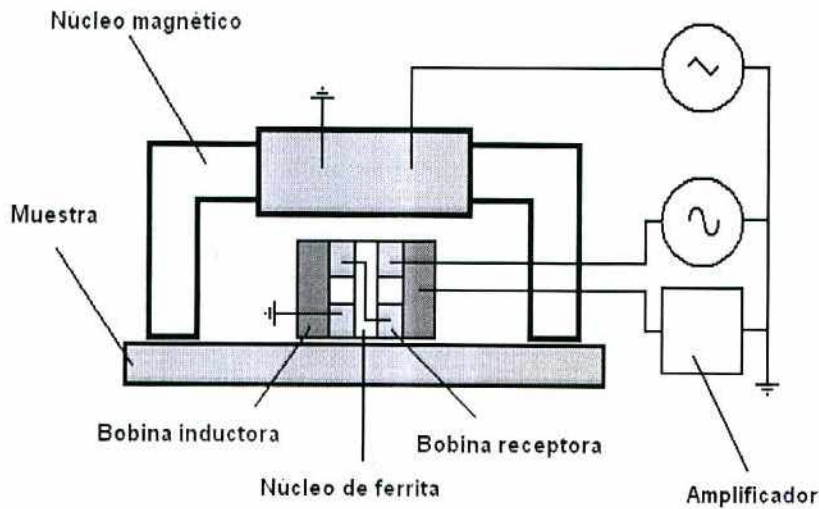


Figura 4.13
Esquema de medición de la permeabilidad incremental [84].

En la Figura 4.13 se representa un esquema del circuito de medición de la permeabilidad incremental. La muestra insertada en el transformador crea un entorno con permeabilidad magnética μ , el cual depende de la intensidad de campo H aplicada. Debido a la ley de Faraday, cada cambio de la corriente en el circuito inductor $I(t)$ (lo cual produce cambios en la intensidad de campo ΔH), induce una tensión $V_{ind}(t)$ en la bobina receptora. Luego de una preamplificación, un filtrado de paso banda y una integración, se obtiene la tensión resultante V_{int} , la cual es proporcional al cambio de la inducción magnética ΔB (ver Figura 4.12). La razón

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

se define como permeabilidad incremental, siendo función de las intensidades H_1 y H_2 (ver Figura 4.12) y de las propiedades magnéticas del material [85, 86, 87].

4.2.2.1 Resultados

En la Figura 4.14 y 4.15 se representan los valores obtenidos en el ensayo de permeabilidad incremental. Igual que lo sucedido con el ensayo de Ruido Barkhausen, presentan comportamientos ferromagnéticos importantes las muestras 0 a 3, en menor escala las muestras 4 y 5, y no presentan este comportamiento el resto de las muestras. Esto se ve más claramente en la Figura 4.15, en la que

se representan los máximos de la permeabilidad incremental μ_{max} (curvas presentes en la Figura 4.15) en función del número de probeta.

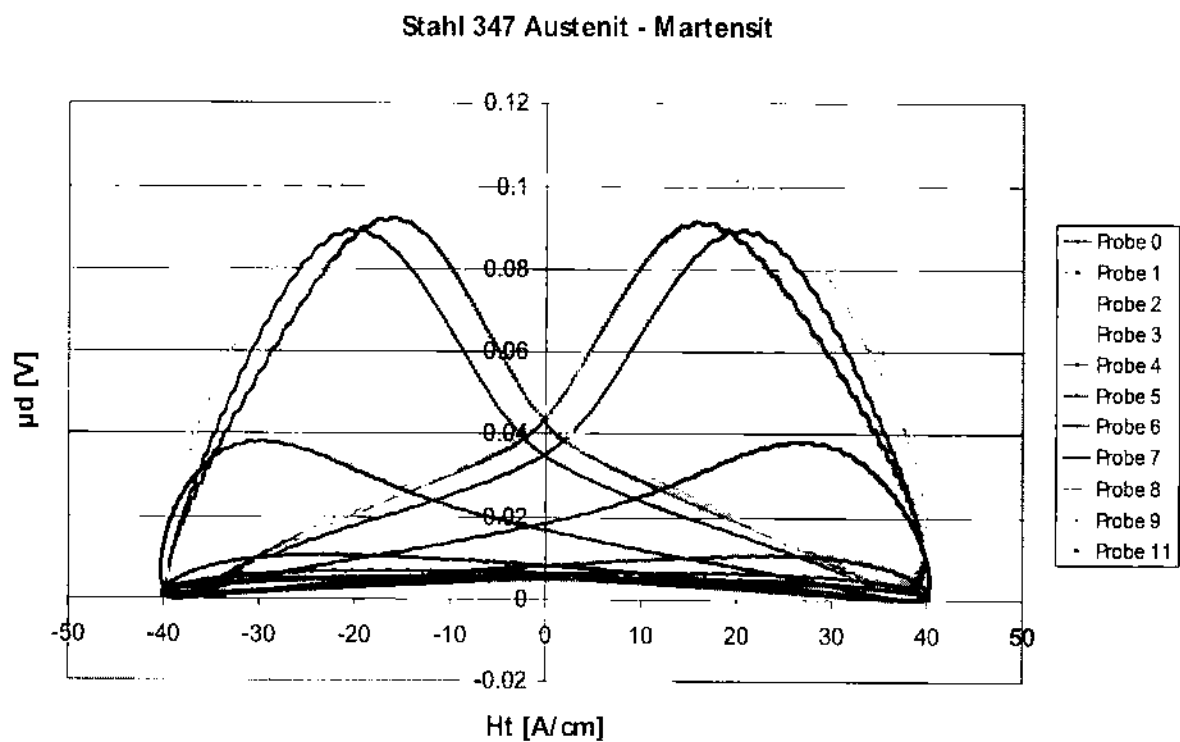


Figura 4.14
Permeabilidad incremental vs. H tangencial: Serie AISI 347.

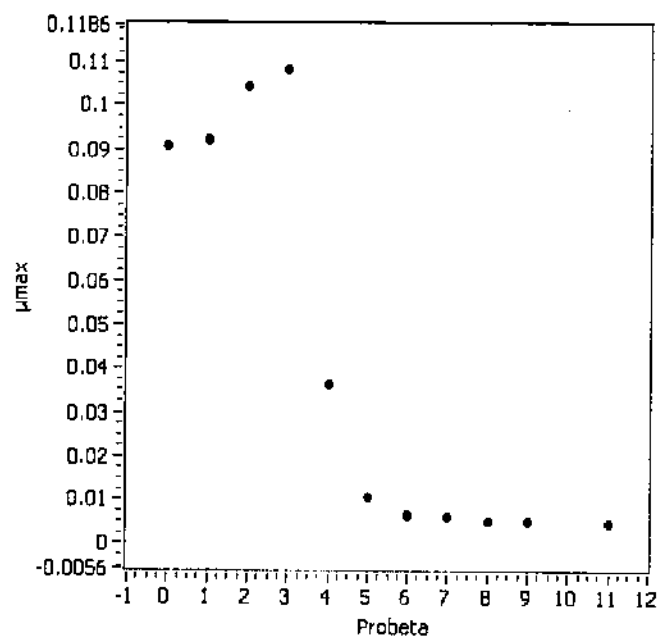


Figura 4.15
Máximo de la permeabilidad incremental: Serie AISI 347.

CAPITULO V

Análisis de los resultados

5.1 Relación entre la permeabilidad magnética y el contenido de martensita

Una posibilidad para estimar el contenido de martensita en muestras de aceros inoxidables austeníticos, es hacerlo a partir de su relación con una de las propiedades magnéticas calculadas, específicamente con la permeabilidad magnética. Dado que, las muestras con distintas proporciones de martensita en una serie tienen aproximadamente la misma conductividad eléctrica (ver Sección 3.2.3.3), no es posible con esta propiedad estimar el contenido de martensita [53].

Con el fin de explorar esta posibilidad se utilizaron distintos tipos de regresiones, lineales y no lineales, buscando la relación que mejor ajuste a los datos experimentales. En la Figura 5.1, a modo de ejemplo, se han representado las cantidades a relacionar, contenido de martensita medido mediante difracción de rayos X (DRX) como función de la permeabilidad magnética, para cada una de las series, junto con la curva de mejor ajuste correspondiente. Se puede apreciar que en todos los casos hay una dependencia logarítmica entre estas magnitudes, con valores altos de R^2 .

Se utilizaron las permeabilidades de las muestras con bajo contenido de martensita, dado que para las muestras con contenidos altos, el ensayo de corrientes inducidas no tiene la sensibilidad adecuada, ocasionado una gran dispersión en los valores calculados. Para esta representación, se eligió la frecuencia de 60 kHz por ninguna razón en particular, ya que para las muestras representadas, los valores de permeabilidad calculada son prácticamente iguales en todas las frecuencias, como se aprecia en las Tablas 3.5 a 3.7.

5.1 Relación entre la permeabilidad magnética y el contenido de martensita

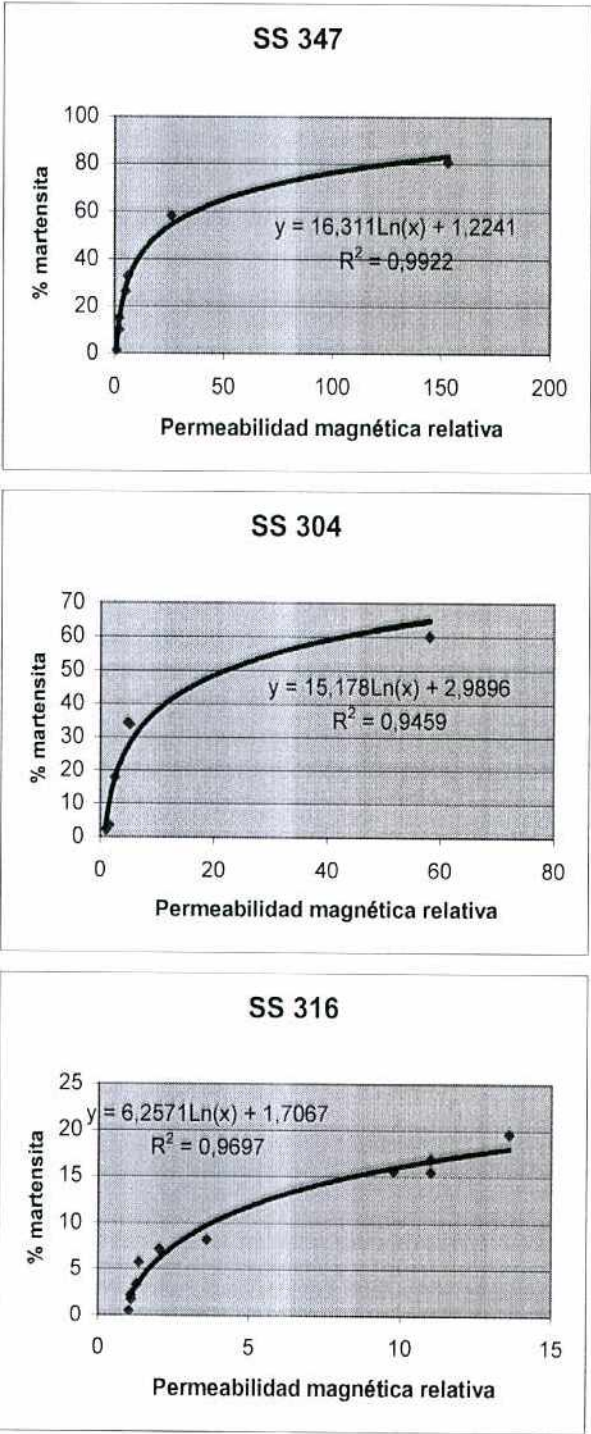


Figura 5.1
% de martensita (DRX) vs. Permeabilidad magnética relativa (60 kHz).

5.2 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

Los materiales utilizados en este trabajo fueron caracterizados en su momento por J. Marengo y P. Álvarez [88], con un método magnético que está descrito en el Apéndice VIII. Una vez realizados los ensayos por corrientes inducidas se buscó relacionar los valores de impedancia calculados a partir del ensayo, con los valores medidos magnéticamente por [88]. Para ello se reorganizó la información obtenida en los ensayos de corrientes inducidas en 3 tablas, una para cada serie de probetas de aceros inoxidables estudiada, que se encuentran en el Apéndice IX.

Para encontrar la mencionada relación entre las componentes de impedancia normalizada, obtenidas mediante el cálculo de la media de los resultados de 20 mediciones, y los valores medidos magnéticamente se llevaron a cabo distintos tipos de análisis de regresión, lineales y no lineales, a fin de establecer una relación estadística entre las variables resistencia y reactancia normalizadas por un lado y proporción de martensita por el otro. Las Figuras 5.2 a 5.4 representan gráficamente los resultados obtenidos.

En la serie AISI 347 (Figura 5.2) se observa una relación lineal entre los valores de reactancia normalizada y la proporción de martensita, con un valor muy bueno en el coeficiente de determinación en las cuatro frecuencias de ensayo. Cabe recordar que el coeficiente de determinación (R^2) establece qué proporción de la variación de la variable dependiente puede atribuirse a una relación lineal entre ambas variables:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

donde y_i son los valores reales de la variable dependiente, $\bar{y}$ es la media de estos valores e $\hat{y}_i$ son los valores calculados con la curva de regresión [61].

Los altos valores de este coeficiente en todas las frecuencias, en el caso de la relación entre la reactancia normalizada y la proporción de martensita, justifican la adopción de este modelo lineal. En el caso de la resistencia normalizada, una ecuación cuadrática parece ser la curva que mejor ajusta, seguida de la lineal (no dibujada), aunque los términos cuadráticos y lineales son muy pequeños. Esto, sugiere que la resistencia normalizada se mantiene constante con la variación del contenido de martensita.

5.2 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

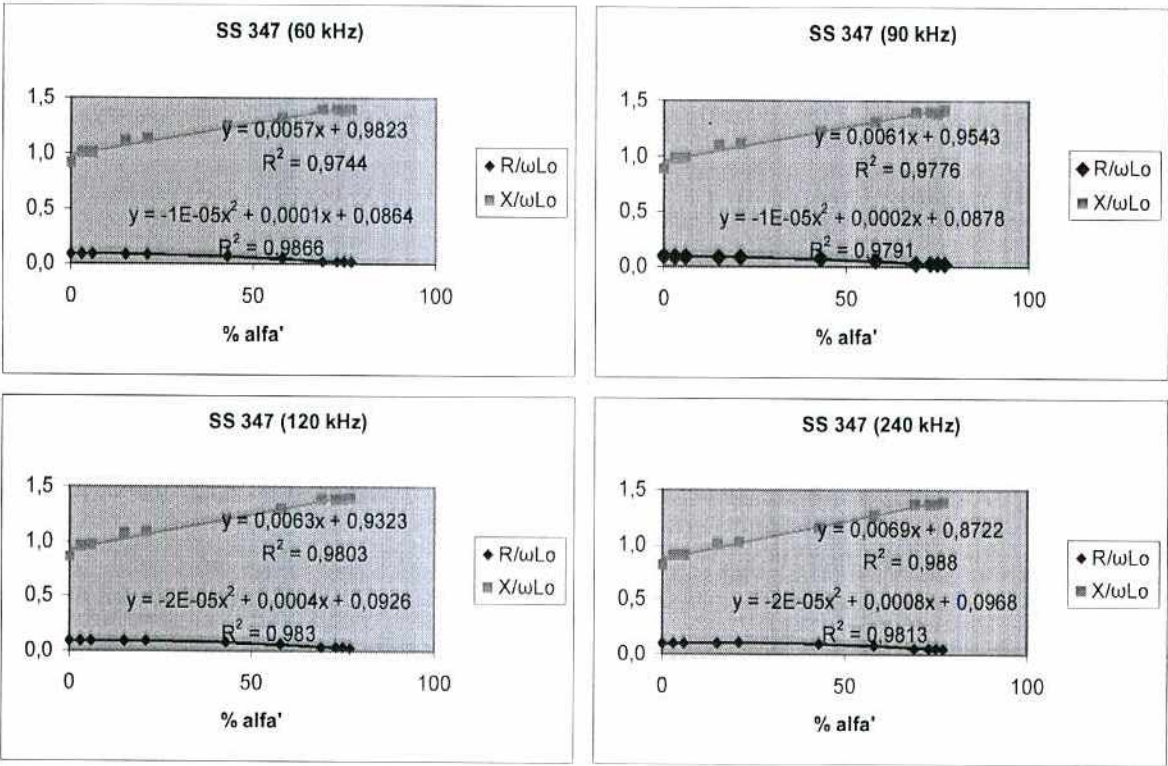


Figura 5.2

Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (método magnético). Serie AISI 347.

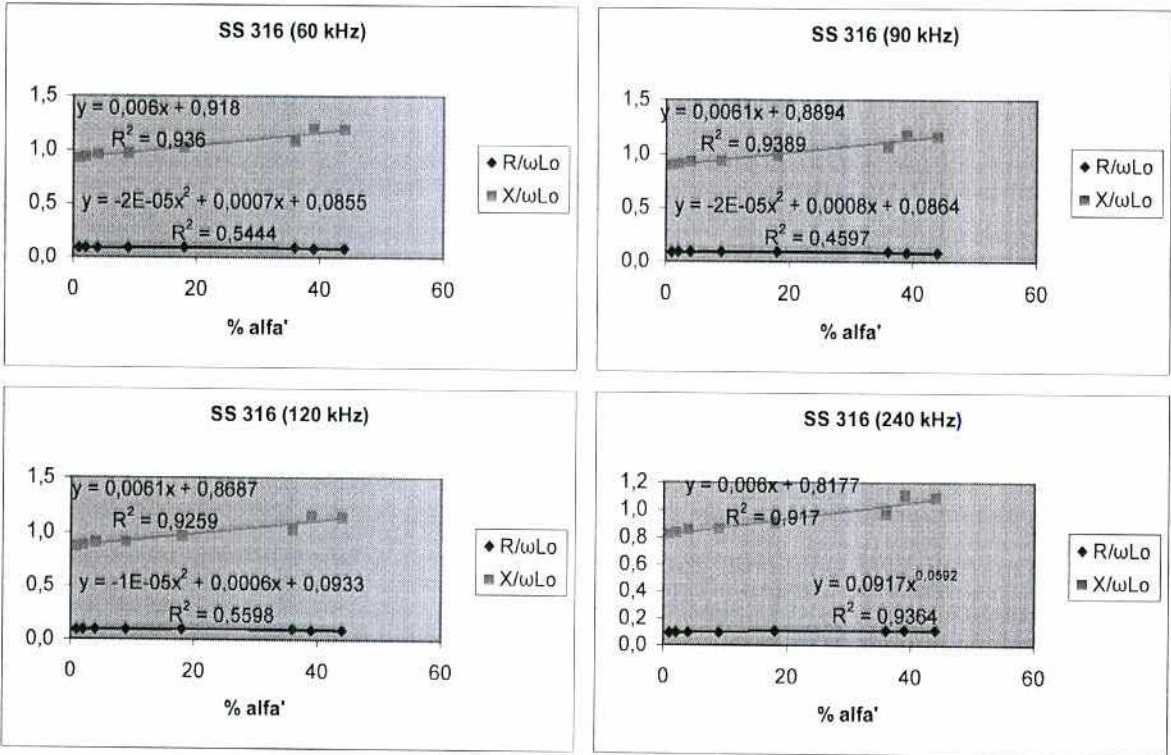


Figura 5.3

Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (método magnético). Serie AISI 316.

5.2 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

El mismo análisis se llevó a cabo para la serie AISI 316 (Figura 5.3) [53]. En el caso de esta serie, al igual que la serie SS 347, se puede ver que hay muy buena correlación lineal entre la reactancia y la proporción de martensita. En el caso de la relación entre la resistencia y la cantidad de martensita, no se observa lo mismo; en las tres frecuencias bajas se aprecia el mismo tipo de relación ya visto para $R/\omega L_0$ vs. $\% \alpha'$ en la serie SS 347, aunque con coeficiente R^2 muy bajo; en la frecuencia 240 kHz, la curva que mejor ajusta es la potencial, pero con un exponente muy bajo. Nuevamente, concluimos que en realidad, la curva de $R/\omega L_0$ vs. $\% \alpha'$ permanece constante, es decir, que el contenido de martensita parece no afectar a la resistencia normalizada.

Con respecto a la serie de AISI 304 (Figura 5.4), nuevamente se observa que hay muy buena correlación lineal entre la reactancia y la proporción de martensita. En el caso de la resistencia, igual que con la serie AISI 347, una ecuación cuadrática parece ser la curva que mejor ajusta, aunque los términos cuadráticos y lineales son muy pequeños, lo cual indica, igual que en las otras series, que la resistencia normalizada no se ve afectada por el contenido de martensita.

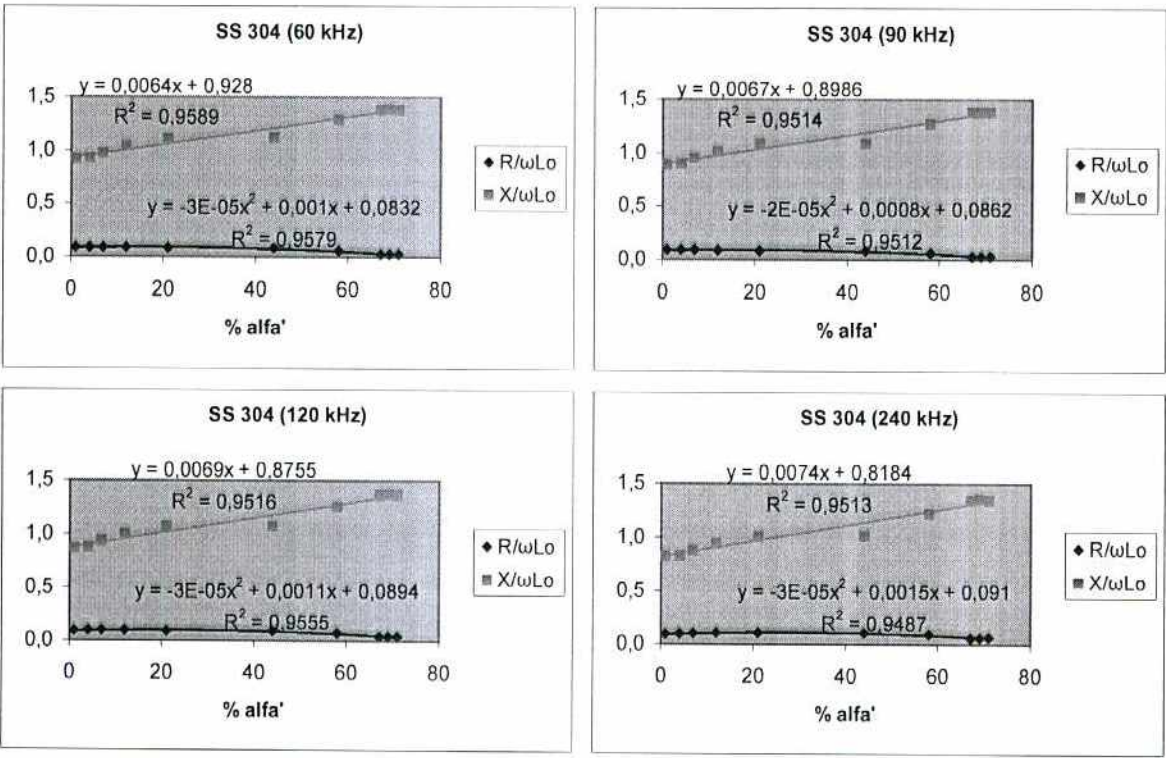


Figura 5.4
Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (método magnético). Serie AISI 304.

Resumiendo el análisis realizado en las tres series de probetas, se pudo establecer, para las tres series y en las cuatro frecuencias, una muy buena correlación lineal, con coeficientes de

5.2 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

determinación (R^2) superiores a 0,91 en la serie SS 316 y a 0,95 en las otras dos series, entre la reactancia calculada y la proporción de martensita medida magnéticamente [88], no así entre ésta y la resistencia calculada, sugiriendo el análisis que la resistencia no es afectada por el contenido de martensita.

También se analizó la relación entre las componentes de impedancia normalizada, obtenidas promediando los resultados de 20 mediciones, y la proporción de martensita de las probetas de las distintas series, determinada a partir de diagramas de DRX. Las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 representan la información obtenida por corrientes inducidas y difracción de rayos X de las series SS 347, SS 316 y SS 304 respectivamente.

Al igual que lo sucedido en el caso de la correlación entre componentes de Z y proporción de α' medida magnéticamente [88], el modelo de regresión lineal es el más apropiado para representar la curva $X/\omega L_0$ vs. $\% \alpha'$ en todas las series y todas las frecuencias, con valores de R^2 superiores a 0,96. También puede llegarse a la misma conclusión que antes con respecto de la curva $R/\omega L_0$ vs. $\% \alpha'$: la resistencia normalizada no se ve afectada por el contenido de martensita.

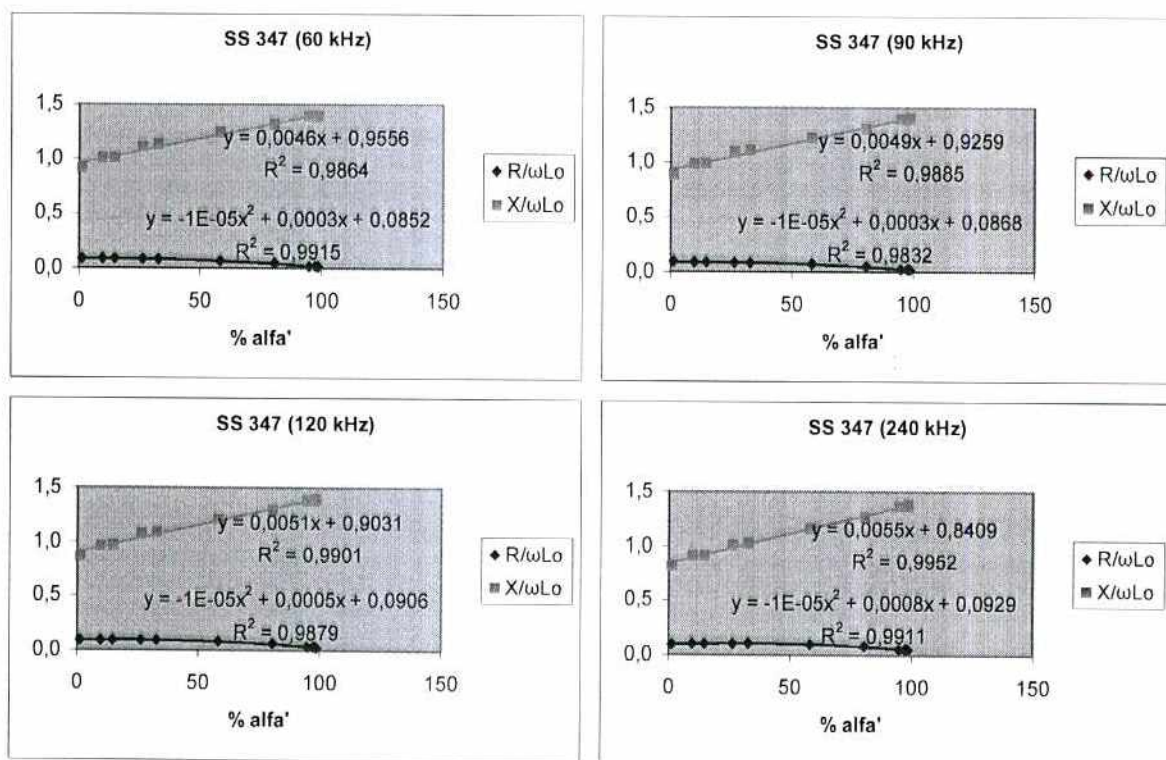


Figura 5.5
Componentes de impedancia normalizada vs. $\%$ de martensita (DRX). Serie AISI 347.

5.2 Relación entre la impedancia de sonda y el contenido de martensita

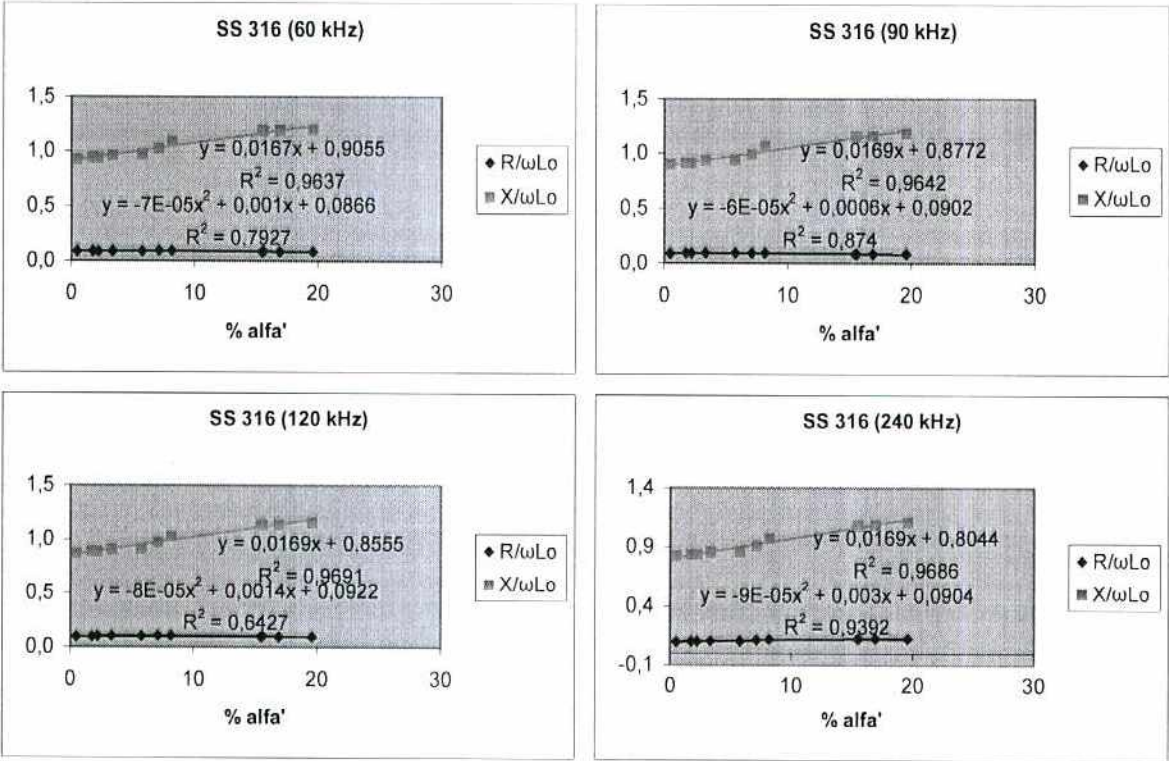


Figura 5.6

Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (DRX). Serie AISI 316 [53].

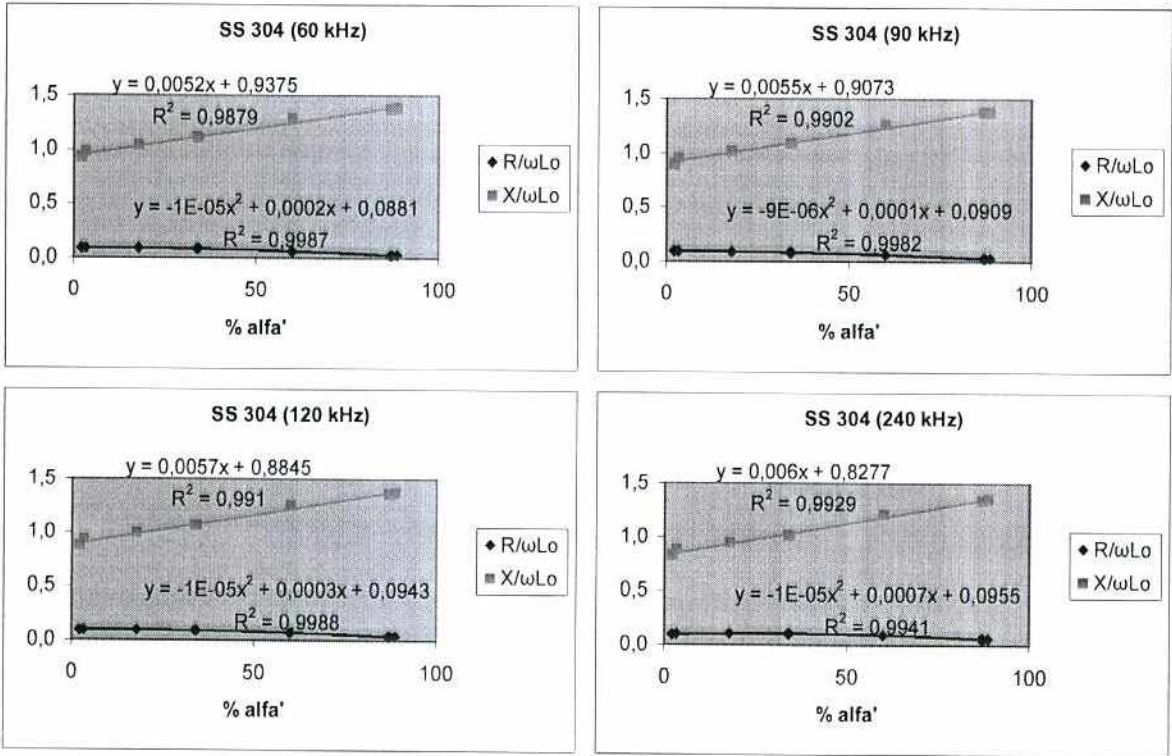


Figura 5.7

Componentes de impedancia normalizada vs. % de martensita (DRX). Serie AISI 304.

5.3 Estimación de la proporción de martensita en aceros inoxidables

Si bien es posible calcular el porcentaje de martensita, ya sea a partir de la permeabilidad magnética, como a partir la reactancia, obtenidas ambas con un ensayo por corrientes inducidas, por simplicidad se utilizó la correlación lineal entre reactancia y la proporción de martensita contenida en muestras de acero inoxidable, para elaborar un método para la estimación de dicha proporción. Para la correcta implementación de este método son necesarias dos muestras del material a ensayar, una totalmente austenítica y otra con una cantidad de martensita contenida conocida. Con estas dos muestras se determina la recta de calibración, y a partir de ésta puede calcularse el porcentaje de martensita que se desconoce en el material a ensayar [52, 53].

Se aplicó este procedimiento a las muestras de la serie AISI 304/2, a modo de ejemplo. Se toman como patrones las muestras 304-2, con un contenido de martensita determinado por rayos X del 87%, y 304-12, con un contenido de 2%. Con los valores de reactancia normalizada obtenidos para esta serie con cada una de las frecuencias utilizadas durante los ensayos, se obtiene una recta de calibración para cada frecuencia (ver Figura 5.8). En esta figura se puede ver para cada frecuencia la recta de calibración, calculada como ya se ha mencionado, junto con los valores correspondientes a las demás muestras de la serie, que no fueron utilizadas como patrones, observándose la proximidad entre estos valores y las rectas de calibración.

El contenido de las muestras de la serie AISI 304/2 se calcula ingresando en la fórmula correspondiente a cada frecuencia con los valores de reactancia normalizada. Los resultados pueden verse en la Tabla 5.4, cuya columna 1ª corresponde al número de muestra, la 2ª al porcentaje de martensita obtenido por DRX, la 3ª a la 6ª al porcentaje de martensita calculado con el método propuesto, para cada frecuencia.

Tabla 5.4

Cálculo del contenido de martensita con el método propuesto, serie AISI 304/2 a 240 kHz.

MUESTRA	% ALFA'	% ALFA' calculado			
SS 347	rayos x	60 kHz	90 kHz	120 kHz	240 kHz
13	70	80	79	79	76
14	36	41	38	38	35
15	3	2	1	1	2
16	3	2	2	2	2

Se observa en la Tabla 5.4 que los valores de porcentaje de α' de las muestras 13 a 16 calculados a partir del ensayo realizado con la frecuencia de 240 kHz, son los que menor diferencia tienen con los obtenidos con DRX. Esto se debe a que esta frecuencia corresponde a la menor penetración de corrientes inducidas, por lo cual, se obtiene información cercana a la superficie, en forma parecida a lo que sucede con los ensayos de DRX.

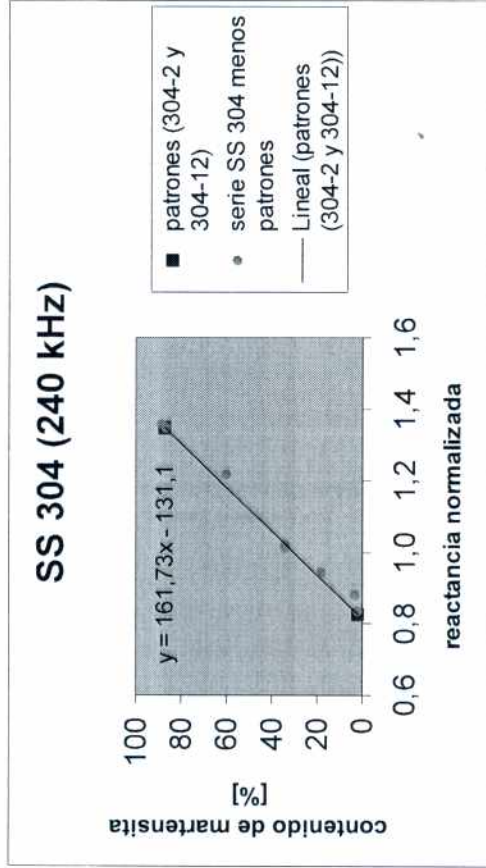
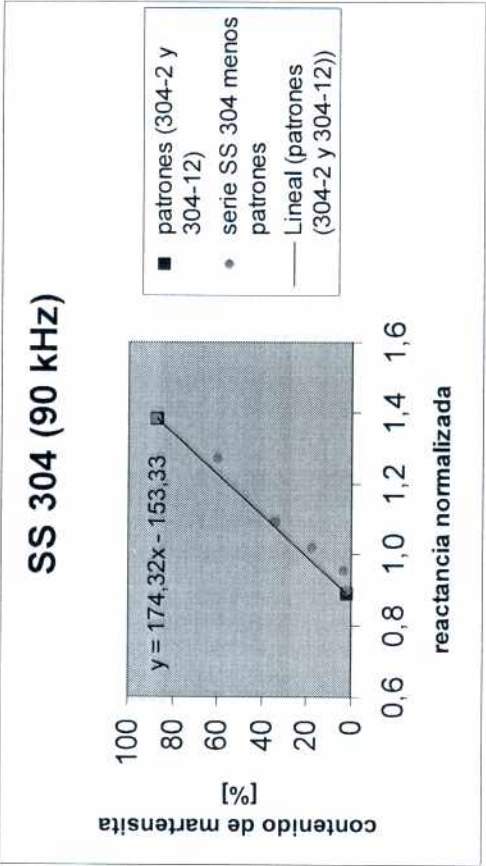
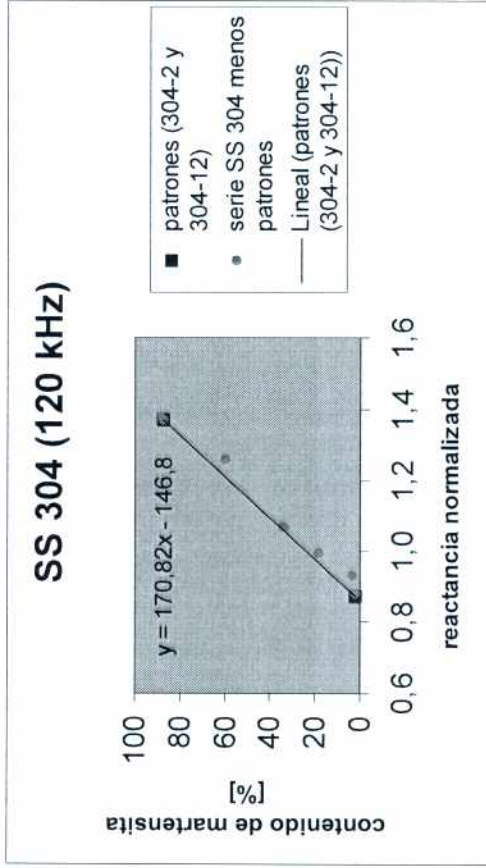
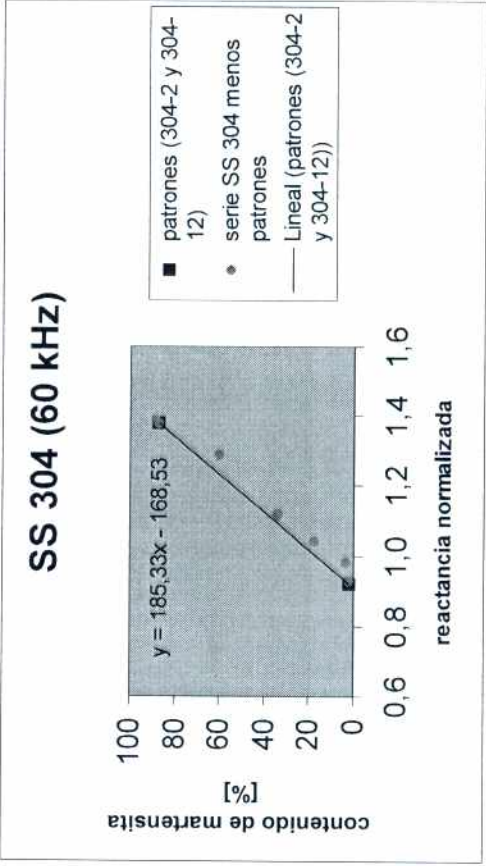


Figura 5.8

Representación de la recta de calibración para cada frecuencia.
(% de martensita medido por DRX)

5.4 Relación entre magnitudes medidas con 3MA y el contenido de martensita

Con los resultados de los ensayos realizados en Saarbrücken con el equipo 3MA junto con los porcentajes de martensita calculados magnéticamente y por difracción de rayos X, y dada la relación lineal encontrada entre la reactancia normalizada medida con un ensayo de corrientes inducidas y la proporción de martensita de las muestras (Sección 5.1), se investigó si existía la misma relación entre las magnitudes medidas con el equipo 3MA y el porcentaje de martensita.

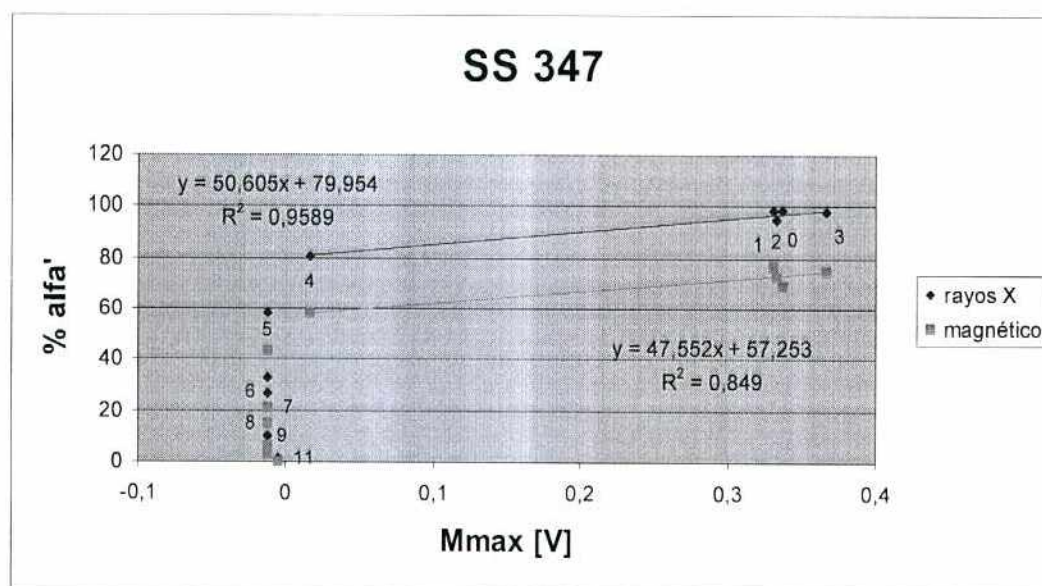


Figura 5.9

Comparación entre el máximo del momento magnético medido por Ruido Barkhausen ($M_{\max}$) y el % de martensita medido con DRX y magnéticamente [88]: Serie AISI 347.

En la Figura 5.9 se aprecia el gráfico de dispersión correspondiente al momento magnético máximo medido mediante un ensayo por Ruido Barkhausen ($M_{\max}$) como función del porcentaje de α' . Se observa que para las muestras mayoritariamente austeníticas (6 a 9 y 11) el equipo no detecta la presencia de un material ferromagnético. Recién entrega señal, aunque baja, con la muestra 4 y da una señal importante sólo para las muestras 0, 1, 2 y 3, que son aquellas con proporciones altas de martensita. Como este ensayo tiene su aplicación restringida a muestras ferromagnéticas [75], se observa este comportamiento sólo en las muestras mayoritariamente martensíticas. El estudio sobre la existencia de la relación lineal entre estas magnitudes, en consecuencia, sólo se realizó con las muestras que arrojan valores importantes de $M_{\max}$, es decir, con aquellas que muestran señal (0 a 4). El bajo valor de R^2 de la relación entre $M_{\max}$ y el porcentaje de α' medido magnéticamente, frente al alto valor de R^2 de la relación entre $M_{\max}$ y el porcentaje de α' obtenido mediante DRX, indica

5.4 Relación entre magnitudes medidas con 3MA y el contenido de martensita

que los datos del 3MA concuerdan mejor estos últimos, lo mismo que se observó con los datos obtenidos en nuestro laboratorio.

En la Figura 5.10 se encuentra el gráfico que relaciona al máximo de la permeabilidad incremental ($\bullet_{\max}$) como función del porcentaje de α' . En este ensayo se aprecia un comportamiento similar al descrito en el caso de $M_{\max}$: sólo hay una señal considerable para las muestras mayormente martensíticas. Estos resultados nos confirman también el comportamiento ferromagnético de las muestras mayoritariamente martensíticas. Cuando se estudia un posible comportamiento lineal entre $\bullet_{\max}$ y la cantidad de α' , se observan valores de R^2 del orden de 0,9; no pudiéndose afirmar la existencia de una relación lineal.

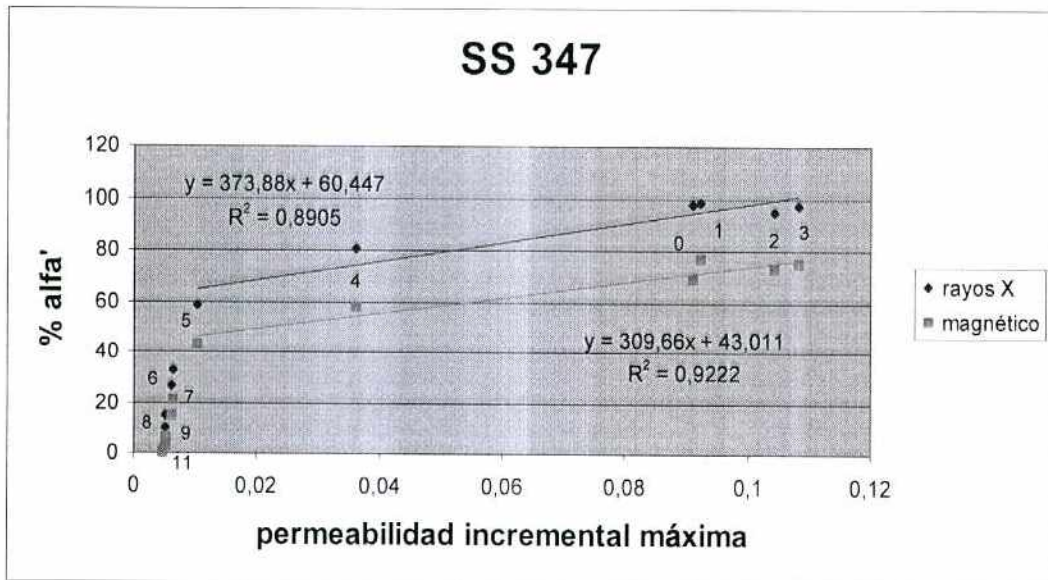


Figura 5.10

Comparación entre el máximo de la permeabilidad incremental y el % de martensita medido con DRX y magnéticamente [88]: Serie AISI 347.

CAPITULO VI

Discusión

En este trabajo se ha desarrollado un modelo matemático para el fenómeno de corrientes inducidas producidas por una sonda acoplada a una muestra magnética. Se realizaron ensayos de corrientes inducidas a tres series de muestras de acero inoxidable AISI 304, 316 y 347, con distinto contenido de la fase martensita α' en cada muestra de la serie, y a partir de los resultados obtenidos y, utilizando el modelo desarrollado para resolver el problema inverso, se han estimado las propiedades electromagnéticas de cada probeta de cada una de las tres series de muestras de acero inoxidable. Mediante ensayos por difracción de rayos X, se midió el contenido de martensita de cada probeta de cada una de las tres series de muestras de acero inoxidable. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de corrientes inducidas y en los ensayos de difracción de rayos X, se desarrolló un método para estimar el contenido de martensita α' en aceros inoxidables de los tipos mencionados a través de un ensayo no destructivo.

6.1 El modelo matemático

En la literatura no se han encontrado soluciones al problema de las corrientes inducidas en medios magnéticos. Sin embargo hay una buena cantidad de soluciones elaboradas por otros autores para medios no magnéticos, que abarcan problemas en medios planos y cilíndricos, con una, dos y múltiples capas, que se modelan con ecuaciones diferenciales, obtenidas a partir de las ecuaciones de Maxwell, resueltas en forma exacta (modelos analíticos) o numérica (modelos cuasianalíticos), o bien, que utilizan modelos simplificados, como ser la aplicación del modelo del transformador eléctrico [40, 41, 44, 45, 46].

Es por ello que se desarrolló un modelo matemático, que incluye la problemática de los medios magnéticos lineales, que permite transformar las lecturas obtenidas con un equipo convencional de ensayos por corrientes inducidas, expresadas en valores de tensiones horizontal y vertical, con los que el equipo elabora los gráficos que presenta en un monitor de PC, en valores de impedancia compleja, utilizando patrones para la calibración. Con estos resultados, al trabajarlos en sentido inverso, se pueden hallar los valores de las propiedades electromagnéticas, conductividad eléctrica y permeabilidad magnética relativa de materiales metálicos magnéticos.

Las curvas teóricas trazadas con el presente modelo concuerdan con curvas presentadas por Cecco y col [40]. En la Figura 6.1 se graficaron curvas correspondientes a impedancias calculadas con este modelo, obtenidas con distintos valores de las variables σ (conductividad eléctrica) y μ_r

6.1 El modelo matemático

(permeabilidad magnética relativa). Todas las impedancias representadas en la Figura 6.1 fueron calculadas para una frecuencia de 50 kHz. Las cuatro curvas señaladas en azul en ese gráfico representan Z_{nor} (impedancias de sonda normalizada) calculadas para diferentes valores de σ que van desde 10 a 10^{10} S/m y μ_r constante. Las cuatro curvas señaladas en rojo representan Z_{nor} correspondientes a valores de μ_r que van desde 1 a 10, cada una calculada para un valor particular de σ . En la Figura 6.2, se representan las mismas curvas calculadas por Cecco [40].

Para facilitar el análisis, las curvas marcadas en rojo están identificadas con la resistividad del material, $\rho = 1/\sigma$ (ver Tabla 6.1). Se eligieron los mismos valores que usó [40] para los resultados que se presentan en la Figura 6.2. Se puede apreciar la concordancia entre ambas figuras, excepto en el rango de variación de la reactancia normalizada. Esta ligera variación se debe seguramente a la utilización de diferentes parámetros de bobina, ya que en la representación de la Figura 6.1 se usaron los mismos que se emplearon en los ensayos, en tanto se desconocen los parámetros usados en la Figura 6.2.

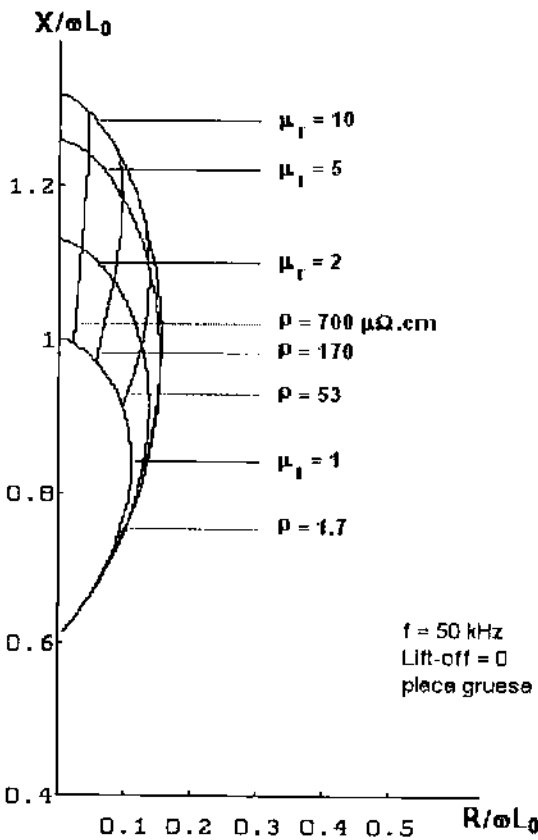


Figura 6.1
Plano teórico de impedancia normalizada,
obtenido con el modelo presentado.

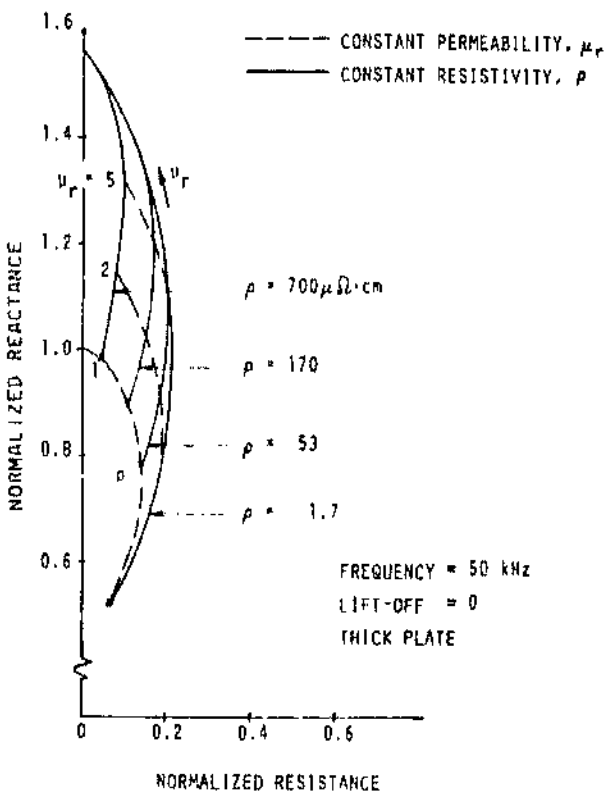


Figura 6.2
Esquema del plano teórico de impedancia
normalizada [40].

Tabla 6.1
Conductividades usadas en las figura 6.1, 6.3 y 6.5

$p=1/\sigma$. [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]	σ [S/m]
700	$1,4 \cdot 10^{-5}$
170	$5,8 \cdot 10^{-5}$
53	$1,9 \cdot 10^{-6}$
21	$4,9 \cdot 10^{-6}$
7	$1,4 \cdot 10^{-7}$
1,7	$5,8 \cdot 10^{-7}$

En la Figura 6.3 se graficaron 5 curvas de lift-off (distancia entre la bobina y la probeta) variable, para diferentes materiales con distintos valores de resistividad eléctrica, todos con permeabilidad magnética $\mu_r = 1$; y cinco curvas de conductividad variable para distintos valores de lift-off. En la Figura 6.4, se representan las mismas curvas calculadas por Cecco [40]. Se observa buena concordancia, pudiéndose explicar las diferencias con el argumento mencionado en el párrafo anterior.

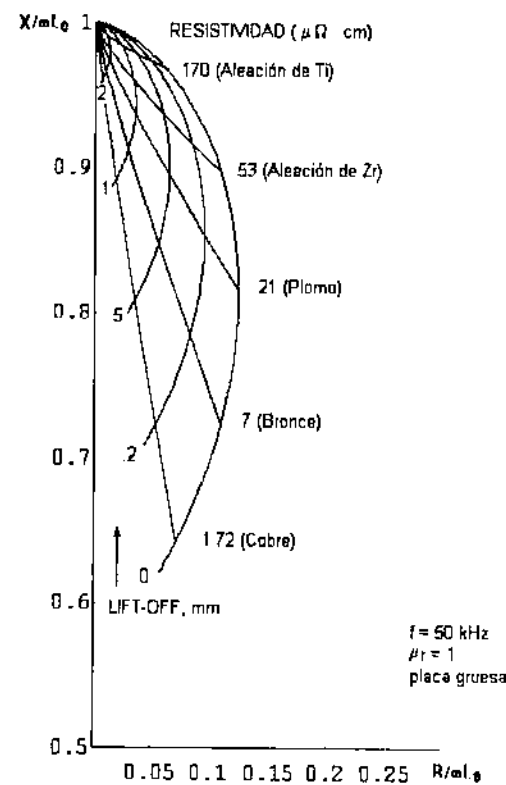


Figura 6.3
Plano teórico de impedancia normalizada, obtenido con el modelo presentado.

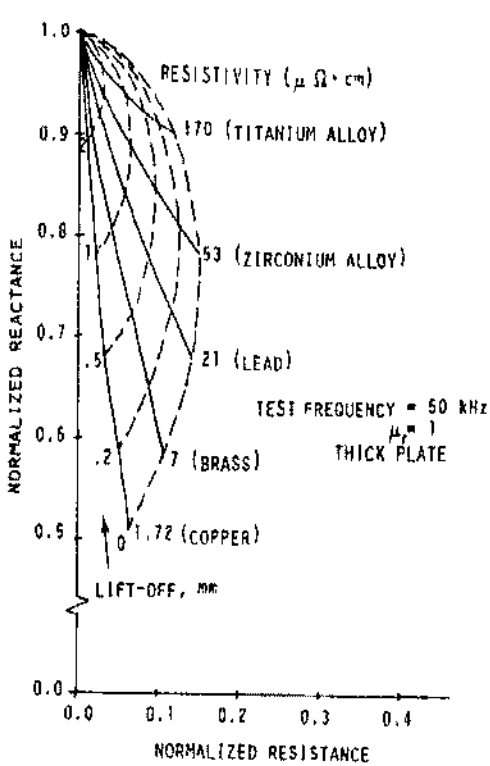


Figura 6.4
Esquema del plano teórico de impedancia normalizada [40].

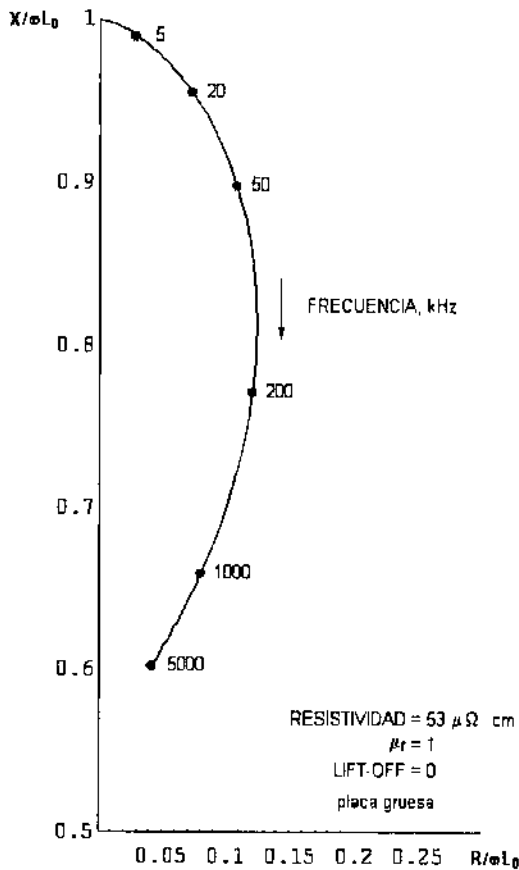


Figura 6.5
Plano teórico de impedancia normalizada,
obtenido con el modelo
presentado.

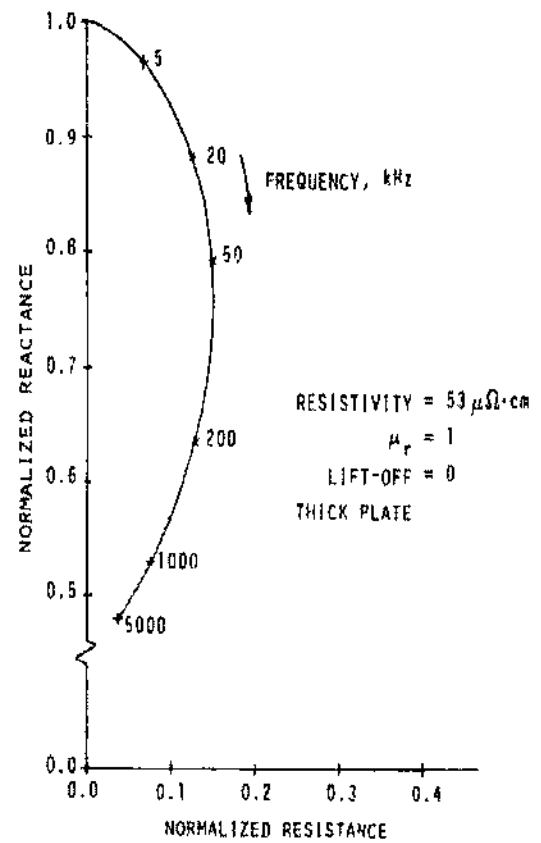


Figura 6.6
Esquema del plano teórico de impedancia
normalizada [40].

En la Figura 6.5 se graficaron la curva de frecuencia variable para un material con resistividad eléctrica igual a $53 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y con permeabilidad magnética $\mu_r = 1$; y seis puntos correspondientes al mismo material para 5 frecuencias fijas. En la Figura 6.6, se representan las mismas curvas y puntos calculados por Cecco [40]. Se observa buena concordancia, pudiéndose explicar las diferencias con el argumento ya mencionado.

6.1.1 Hipótesis del modelo

Las hipótesis planteadas son las siguientes:

- configuración axisimétrica,
- ausencia de fenómenos capacitivos,
- densidad de corriente aplicada constante,
- densidad de espiras constante en la bobina,

- material con conductividad eléctrica σ constante.
- material con permeabilidad magnética μ constante.

Excepto la última, las demás hipótesis planteadas son comunes para la mayoría de los desarrollos en ensayos por corrientes inducidas [40, 41, 44, 45, 46].

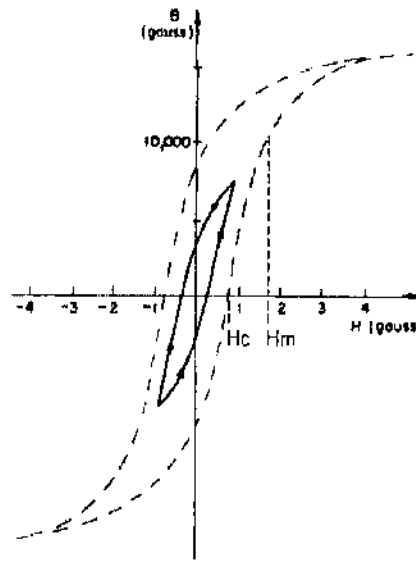


Figura 6.7
Lazo de histéresis que no ha alcanzado la saturación [89].

En consecuencia, se analizará el alcance y validez de la última hipótesis planteada, para el caso de los materiales utilizados en este trabajo:

1. La técnica de ensayos por corrientes inducidas, al igual que el ensayo magnético de permeabilidad incremental, son ambas técnicas magnéticas reversibles. Con este tipo de técnicas, el material es magnetizado con una intensidad de campo magnético, de amplitud $\cdot H$, muy pequeña, en comparación con la fuerza coercitiva H_c del material. Por lo tanto, todas las técnicas actuales por corrientes inducidas utilizan corrientes eléctricas pequeñas en la bobina sensora, resultando entonces, un $\cdot H$ pequeño ($\cdot H \ll H_c$), realizando procesos magnéticos reversibles [75]. En consecuencia, al trabajar con corrientes pequeñas, se obtienen curvas de histéresis como la que se ha trazado en línea continua en la Figura 6.7.
2. Por otra parte, Feynman [89] afirma que los materiales magnéticos blandos, bajo la influencia de campos magnéticos de baja intensidad, pueden ser tratados como un medio lineal, y en consecuencia, $\cdot \mu$ ser tratado como una constante. En la Sección 1.7 se vio que los aceros inoxidables austeníticos, cuando han sido trabajados en frío, son materiales

magnéticos blandos, por lo tanto, bajo campos de pequeña intensidad, pueden ser considerados un medio con μ_r constante. Para comprobar si ésta es la situación del presente trabajo, se deberá calcular la intensidad de campo magnético H generado por la sonda del equipo de corrientes inducidas, la cual puede estimarse con la siguiente fórmula [48]:

$$H = \frac{nI}{2r}$$

donde n es el número de vueltas de la bobina, I es la corriente eléctrica medida en Ampere que circula por ella y r es el radio medio de la bobina expresado en metros.

En la Tabla 6.2 se encuentran los valores de H calculados. En esta tabla la primera columna corresponde a la frecuencia de ensayo en kHz; las segunda y tercera columnas a las componentes de impedancia en Ohm de la sonda utilizada, medida con un analizador de impedancias Solartron para cada una de las frecuencias usadas en este trabajo; la cuarta columna a la resistencia interna del equipo MAD8D™ en Ohm; la quinta al módulo de la impedancia total del circuito; la sexta columna a la tensión suministrada por el equipo MAD8D™ en Volt; la séptima a la corriente calculada en Ampere, las octava y novena corresponden al radio medio en metro y al número de vueltas de la sonda, y la última columna a la intensidad de campo estimada para cada frecuencia en Ampere/metro:

Tabla 6.2

Estimación de la intensidad de campo magnético empleada para cada frecuencia de ensayo.

f(kHz)	Impedancia Sonda		Imped. Equipo	Imped. total	Equipo	I [A]	Geometría Sonda		H [A/m]
	Re(Z) [·]	Im(Z) [·]	Re(Z) [·]	Mod(Z) [·]			r [m]	n [vueltas]	
60	4	37	50	65	2	0,031	0,0008	200	3.820
90	4	55	50	77	2	0,026	0,0008	200	3.230
120	4	74	50	92	2	0,022	0,0008	200	2.728
240	5	148	50	158	2	0,013	0,0008	200	1.585

Para que la hipótesis sea válida, al ingresar con este valor en la curva de magnetización correspondiente al material utilizado debería verificarse que el campo generado es menor que el necesario para llevar el material al estado de saturación magnética (H_m) (ver Figura 6.7). Dada la imposibilidad de disponer de estas curvas, se comparó el H calculado con el valor $H_m = 16000 \text{ A/m}$, reportado por Dietrich [34], utilizado en la caracterización de distintos aceros inoxidable austeníticos, verificándose que $H < H_m$ para todas las frecuencias utilizadas en este ensayo.

6.2 Ensayos por corrientes inducidas

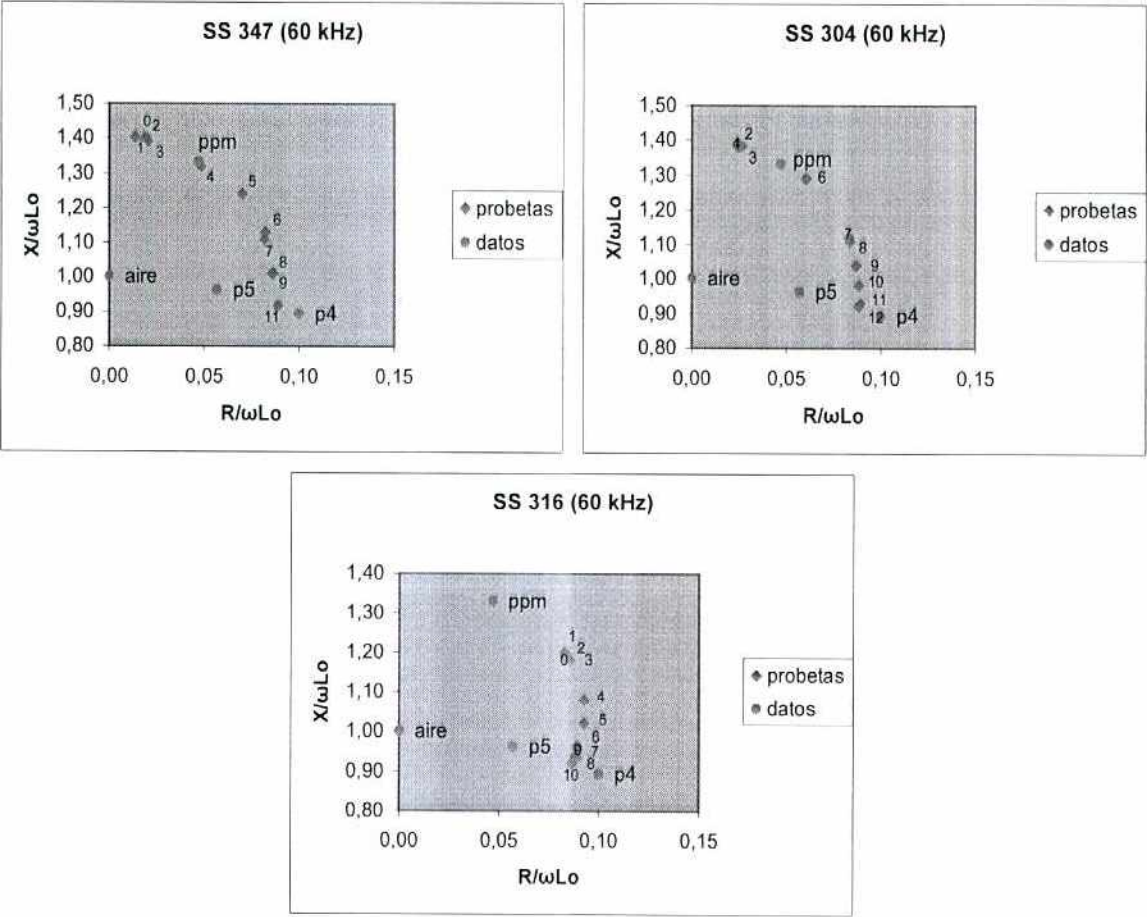


Figura 6.8
Representación en plano de impedancia (60 kHz).

En la Figura 6.8, se han representado nuevamente, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos a partir de los ensayos de corrientes inducidas en la frecuencia de 60 kHz, ya representados en las Figuras 3.10, 3.13 y 3.16. Se aprecia allí el comportamiento de cada serie de probetas, pudiéndose hacer comparaciones entre ellas. El comportamiento de las series AISI 304 y 347 es similar. Los rangos de variación de la resistencia y reactancia normalizadas son similares. En el caso de la serie SS 347, las probetas 0, 1, 2 y 3 demuestran tener valores de μ_r superiores al patrón de permeabilidad magnética relativa (PPM). Estas son las probetas que presentaron un comportamiento ferromagnético durante los ensayos con el equipo 3MA (ver Sección 4.2). El resto de las integrantes de esta serie tienen permeabilidad magnética relativa menor que el PPM. La probeta 11 aparece claramente situada sobre la curva de $\mu_r=1$ constante. Para la serie SS 304, las muestras con valores de μ_r superiores al PPM son las 2, 3 y 4. De haber sido posible ensayar estas muestras con el 3MA, hubieran demostrado comportamiento ferromagnético. La muestra 12, que se sitúa sobre la curva de $\mu_r=1$ constante, es la totalmente austenítica. El comportamiento de la serie

SS 316 es diferente, ya que todas las muestras tienen valores de μ_r inferiores al PPM. La muestra 10 es la que se sitúa sobre la curva de $\mu_r=1$ constante, y por lo tanto, totalmente austenítica. Esta diferencia de comportamiento de la serie SS 316 puede explicarse a partir de su composición (ver Tabla 3.1), ya que tiene casi un 2% más de Ni y un 2% menos de Cr que los aceros SS 347 y SS304, lo cual le da mayor estabilidad a la fase austenita y lo hace menos sensible a la transformación martensítica [17, 69, 90]. Este comportamiento, también fue reportado por Dietrich [34].

Las pequeñas variaciones de resistencia eléctrica con respecto a la frecuencia, que se aprecian en las Figuras 3.10, 3.13 y 3.16, se deben a que la impedancia normalizada (Ec. (47)) depende, a través de los parámetros α y β , de la frecuencia de ensayo. Esto ocasiona un corrimiento del punto de trabajo, tal como se puede observar en la Figura 6.9 con el punto de trabajo correspondiente al bronce.

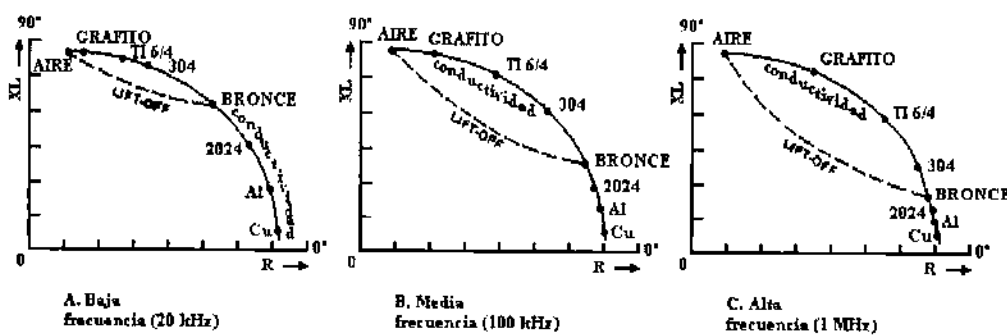


Figura 6.9

Representación del plano de impedancias para distintas frecuencias de trabajo [42].

En la sección 5.1 se correlacionaron las componentes de la impedancia de sonda con la proporción de martensita, llegándose a la conclusión de que el modelo de regresión lineal es el más apropiado para representar la curva $X/\omega L_0$ vs. $\% \alpha'$ en todas las series, para todas las frecuencias, tanto para los valores de $\% \alpha'$ medidos magnéticamente como por difracción de rayos X, con valores de R^2 superiores a 0.93 en todos los casos. También se concluyó que la resistencia normalizada no se ve afectada por el contenido de martensita. ¿Por qué el contenido de martensita sólo afecta a la reactancia y no a la resistencia?: la situación de una sonda por la que circula corriente alterna acoplada a una muestra metálica es similar a la de un transformador eléctrico, la sonda es el circuito eléctrico primario, la muestra el secundario y cuando la muestra es magnética, ésta también forma parte del circuito magnético, por lo que una variación de la permeabilidad magnética, provocada por un cambio en el contenido de martensita, modifica el coeficiente de autoinducción, el cual sólo modifica la reactancia total vista desde el circuito primario.

6.3 Cálculo de las propiedades electromagnéticas

La conductividad eléctrica calculada (ver Sección 3.2.3) para las muestras austeníticas de cada serie a partir de ensayos de corrientes inducidas, concuerda con la literatura. Puede llegarse a esta conclusión si se comparan los valores de las Tablas 3.4 a 3.6, transcriptos en la Tabla 6.2, en la que se muestran en la segunda columna los valores de σ obtenidos en la bibliografía [56], y en la restantes columnas, los valores obtenidos con el procedimiento de la sección 3.2.3.3.

Tabla 6.2

Conductividad eléctrica (σ) calculada para cada serie de probetas

Material AISI	Conductividad eléctrica [10^6 S/m]				
	Tabla [56]	Calculado			
		60 kHz	90 kHz	120 kHz	240 kHz
304	1,43	1,3	1,3	1,2	1,1
316	1,37	1,3	1,2	1,2	1,1
347	1,39	1,4	1,3	1,3	1,2

Para la permeabilidad magnética, como ya se indicó en la Sección 3.2.33, se obtuvieron resultados previsibles (comparándolas con la permeabilidad magnética del PPM), para todas las muestras de la serie SS 316 y casi todas las muestras de las series SS 304 y SS347, excepto las muestras 0 a 3 de la serie SS 347 y 2 a 4 de la serie SS 304. Estas últimas tienen una gran proporción de martensita, superior al 60%, lo cual las hace mayoritariamente martensíticas. Es más, algunas de estas muestras presentaron comportamiento ferromagnético durante los ensayos de ruido Barkhausen y permeabilidad incremental realizados con la serie SS 347 (Secciones 4.2.1.1 y 4.2.2.1). Como todas tienen valores de μ_r superiores al PPM, las señales correspondientes se ubican en una zona del diagrama de impedancias, en que un ensayo de corrientes inducidas tiene baja sensibilidad, lo que explica la gran dispersión que presentan los valores de μ_r calculados. .

La relación entre μ_r y la cantidad de fase α' , por lo menos en el rango en el cual un ensayo de corrientes inducidas tiene la sensibilidad apropiada, es logarítmica (ver Sección 5.2). El sentido físico de este resultado experimental, que excede el alcance de este trabajo, debe aun estudiarse y ampliarse para otros tipos de aceros inoxidables austeníticos. Sin arriesgar conclusiones definitivas se puede suponer que se trata de una propiedad física “efectiva” (Ej.: constantes elásticas, conductividad térmica y eléctrica) de un material bifásico, para la cual podría encontrarse una ecuación predictiva, función de las propiedades y proporciones de sus fases individuales [91, 92].

6.4 Ensayos por Difracción de Rayos X

Se compararon los valores de la proporción de martensita medidos magnéticamente [88], con los obtenidos mediante difractometría por Rayos X. La Figura 6.10 muestra la comparación para las distintas series de probetas. Las mayores diferencias se observan para los contenidos de martensita más altos.

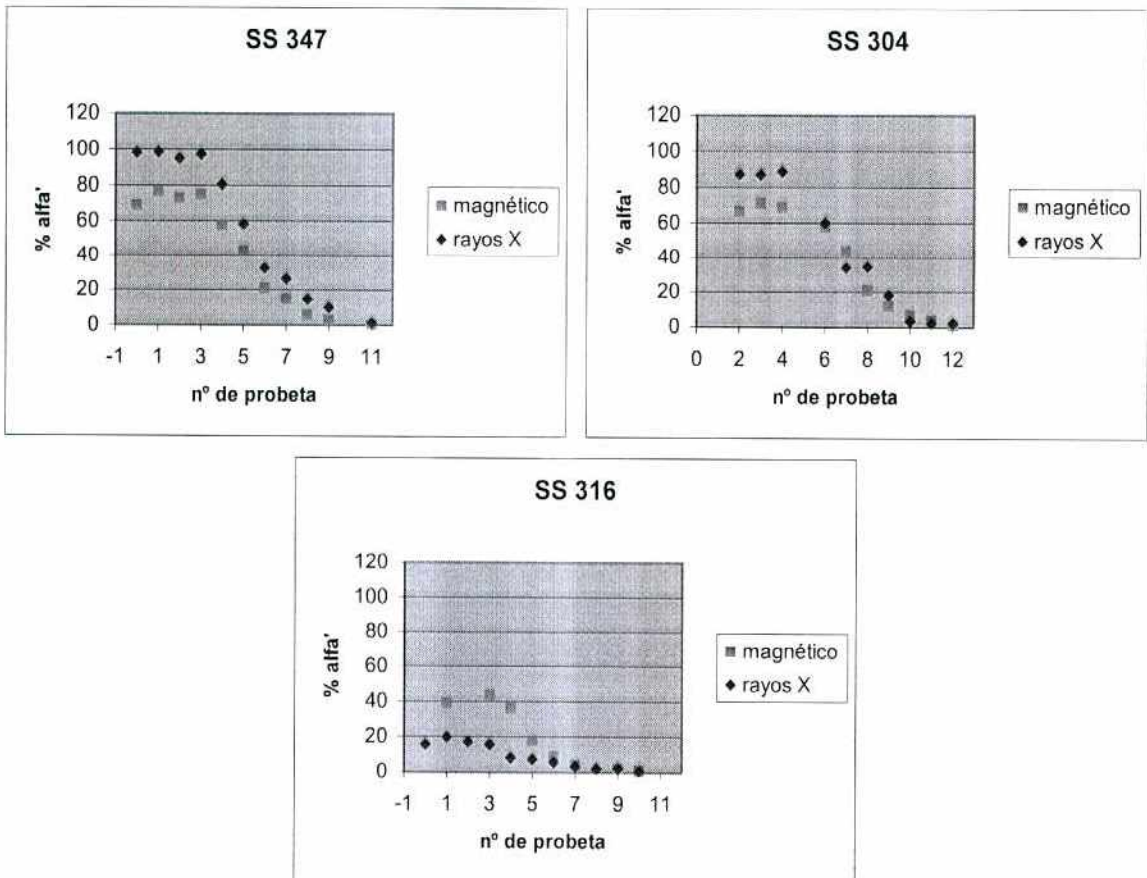


Figura 6.10

Comparación entre el % de martensita medido magnéticamente [88] y por DRX.

En las series AISI 347 y 304 los valores obtenidos con rayos X son en general mayores que los obtenidos magnéticamente, en cambio en la serie AISI 316 es al revés. Los valores medidos magnéticamente fueron obtenidos con un ferrideltímetro, el cual se calibra en función de la permeabilidad magnética de la ferrita δ , que es distinta de la de la martensita α' . La permeabilidad magnética de esta última también depende de la composición del acero, pues el entorno magnético es influido por los porcentajes de Fe, Cr y Ni de la aleación [88, 93]. También, los autores de las mediciones magnéticas reportan que, aun considerando la no-linealidad de los ferrideltímetros, calculan los porcentajes de martensita en forma proporcional, tomando como referencia la lectura hipotética de una muestra teóricamente 100% martensítica. Los valores medidos con rayos X, en

cambio son absolutos y presentan una mejor correlación con los resultados del método no destructivo presentado en este trabajo.

6.5 Estimación de la proporción de martensita en aceros inoxidables

El método propuesto da resultados muy aceptables, más tratándose de un ensayo no destructivo. Si bien existe un margen de error, al considerar la recta trazada a partir de los dos puntos correspondientes a las muestras con mayor y menor contenido de martensita en vez de utilizar la recta de regresión lineal que contempla toda la información obtenida, se gana en practicidad, ya que para lograr las rectas de calibración necesarias para los ensayos, sólo hacen falta dos muestras patrón. Este margen de error es, de a lo sumo, de un 10%, para la muestra con mayor contenido de martensita en la frecuencia más desfavorable (con mayor penetración que los RX), y de 6% en la frecuencia más favorable (ver en la Tabla 5.4).

La condición para utilizar este método es, que es necesario contar, para cada tipo de acero inoxidable que se desee ensayar, con dos patrones de cada material, uno totalmente austenítico y otro con un contenido alto de martensita.

6.6 Ensayos con el equipo 3MA

Los ensayos realizados con este equipo confirmaron la característica ferromagnética de las muestras 0 a 3 de la serie AISI 347.

Al estudiar la posible relación lineal entre el momento magnético máximo medido a partir del ensayo de Ruido Barkhausen, con la proporción de martensita α' contenida en las muestras de la serie SS 347, y considerando sólo las muestras con lecturas significativas, se encontró que la relación entre las magnitudes es aproximadamente lineal en el caso del porcentaje de martensita medido magnéticamente y lineal cuando lo medimos con rayos X. Esto coincide con lo reportado por O'Sullivan y col. [30], que dicen que para deformaciones del material AISI 304 por encima del 30%, el máximo del momento magnético y el contenido de α' , aumentan ambos en forma aproximadamente lineal, mostrando que el $M_{\max}$ es una buena manera de medir el contenido de α' . Por debajo del 30% de deformación, ambas cantidades son insignificantes. Esta coincidencia entre los resultados obtenidos y los de O'Sullivan y col. [30] es válida, aunque se trate de materiales diferentes: AISI 347 utilizado en los ensayos con 3MA y AISI 304 el ensayado en la referencia [30], pues ambos materiales se comportaron de forma muy similar frente a los ensayos que les fueron realizados en este trabajo.

La correlación entre la proporción de martensita α' contenida en las muestras de la serie SS 347 y el máximo de la permeabilidad incremental sólo es aproximadamente lineal, considerando sólo las muestras mayoritariamente martensíticas y comparando con el contenido de α' medido por cualquiera de los dos métodos.

CAPITULO VII

Conclusiones

7.1 Conclusiones

1. Se observó un buen acuerdo entre las simulaciones creadas con el modelo matemático desarrollado y las curvas experimentales situadas en el plano Z, obtenidas por otros autores.
2. El software que presentamos ofrece un método para el procesamiento de datos de corrientes inducidas para calcular los valores de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética en muestras de acero inoxidable austenítico con bajo contenido de martensita.
3. Se verificó una relación lineal entre la componente imaginaria de Z experimental y el contenido de martensita α' de las probetas, que permite, teniendo dos patrones de calibración del material a ensayar, uno sin martensita y otro con una proporción máxima, estimar el contenido de martensita transformada, cuando es la fase minoritaria, en un acero inoxidable austenítico, a partir de un ensayo no destructivo de corrientes inducidas.
4. Los valores calculados de cantidad de martensita contenida en muestras de aceros inoxidables austeníticos, confirman lo observado por otros autores respecto de su evolución con respecto a la temperatura del tratamiento térmico de reversión a austenita.
5. Se ha comprobado que el momento magnético máximo medido por ruido magnético de Barkhausen, es una forma adecuada de estimar, en aceros inoxidables austeníticos, el contenido de martensita α' , siempre y cuando ésta sea la fase mayoritaria (>80%, a juzgar por los resultados presentados en esta tesis).

7.2 *Trabajos por realizar*

1. Elaborar un software compacto que integre todas las rutinas de programación desarrolladas para realizar todas los cálculos más fácilmente.
2. Realizar estudios más profundos, a fin de estudiar las relaciones lineales encontradas entre las componentes de Z experimental y el contenido de martensita α' de las probetas, y extender su alcance a otros tipos de aceros inoxidables austeníticos.
3. Estudiar en profundidad la relación entre el contenido de martensita α' de las probetas y el momento magnético máximo medido por ruido magnético de Barkhausen en aceros inoxidables austeníticos.
4. Estudiar la relación entre la permeabilidad relativa y el contenido de martensita de las probetas de aceros inoxidables austeníticos.
5. Explorar la utilidad del método para la cuantificación del contenido de ferrita δ en soldaduras de aceros inoxidables austeníticos.

APÉNDICE I

Función Impedancia

```

BeginPackage["Impedancia`"]

Impedancia::usage="Impedancia[sigma,muerre,epsilon,{r1,r2,l1,l2,n},f]
    calcula la impedancia"

Begin[["Private`"]]

Impedancia[sigma_,muerre_,epsilon_,{r1_,r2_,l1_,l2_,n_},f_] :=
    Module[{alfa,alfa0,alfa1,g,x,f1,f2,f3,int1,int2},
        alfa0=Sqrt[alfa^2-(2 Pi f)^2 4 Pi 10^(-7) 8.854 10^(-12)];

        alfa1=Sqrt[alfa^2-(2 Pi f)^2 4 Pi 10^(-7) muerre 8.854 10^(-12) epsilon+I (2 Pi f) 4
        Pi 10^(-7) muerre sigma];

        g[alfa_]:= (muerre alfa0 - alfa1)/(muerre alfa0 + alfa1);

        f1[alfa_]:=NIntegrate[x BesselJ[1,alfa x],{x,r1,r2}];

        f2[alfa_]:= (alfa/alfa0^3)(Exp[-alfa0 l1]-Exp[-alfa0 l2])^2;

        f3[alfa_]:= (alfa/alfa0^2)(2 (l2-l1)+(Exp[-alfa0(l2-l1)]-1) 2/alfa0);

        int1=NIntegrate[f1[alfa]^2 f2[alfa] g[alfa],{alfa,10^-6,10^3}];

        int2=NIntegrate[f1[alfa]^2 f3[alfa],{alfa,10^-6,10^3}];

        I (int1+int2)/int2
    ]

End[ ]

EndPackage[ ]

```

APÉNDICE II***Programa para procesar archivos de datos generados por el
equipo de corrientes inducidas MAD8D™***

```

program leer_eed;

uses
  crt,dos;

var
  txt: file of integer;
  eed: file of byte;
  b1,b2,b3,b4,max,canal,canal2 : byte;
  i,j,k : real;
  archi : string [8];
  canal1 : string [1];
  archi1,archi2 : string [12];
  d,dmax,x1,x2,y1,y2 : real;
  x,xmax,x0,y,ymax,y0 : integer;

procedure buscamax;

begin
  if i=canal then begin
    x0:=x;
    y0:=y;
    write(txt,x0,y0);
    end;
  x1:=x;
  x2:=x0;
  y1:=y;
  y2:=y0;
  d:=((x1-x2)*(x1-x2))+((y1-y2)*(y1-y2));
  if d>dmax then begin
    dmax:=d;
    xmax:=x;
    ymax:=y;
    end;
  if (max=0) and (d>10000) then max:=1;
  if (max=1) and (d<1000) then begin
    write(txt,xmax,ymax);
    dmax:=0;
    xmax:=x0;
    ymax:=y0;
    max:=0
  end;
end;

```

```

function formatoecd(a,b : byte) : integer;

begin
  if b>=240 then formatoecd:=(b-240)*256+a-2048
    else formatoecd:=b*256+a+2048
end;

begin
  clrscr;
  writeln('Ingrese el nombre del archivo a procesar ');
  read(archi);
  writeln('Ingrese el número de canal a procesar ');
  read(canal);
  if canal=4 then canal2:=0 else canal2:=canal;
  archi2:=archi+'.ecd';
  str(canal,canal1);
  delete(archi,8,1);
  archi1:=archi+canal1+'.int';
  assign(txt,archi1);
  rewrite(txt);
  assign(ecd,archi2);
  reset(ecd);
  seek(ecd,200);
  i:=0;
  while not eof(ecd) do
    begin
      i:=i+1;
      k:=i-int(i/4)*4;
      read(ecd,b1);
      read(ecd,b2);
      read(ecd,b3);
      read(ecd,b4);
      x:=formatoecd(b1,b2);
      y:=formatoecd(b3,b4);
      if canal2=k then buscamax;
    end;
  close(ecd);
  close(txt);
end.

```

APÉNDICE III***Programa para determinar la matriz T***

```

f=60000;
name="09090134.int";
<<Impedanc.m
r1=0.5 10^-3;
r2=1.1 10^-3;
l1=0.1 10^-3;
l2=2.1 10^-3;
n=200;
c=.001;
dato1=3;
dato2=4;
sigma={10^-6,2.036 10^6,1.388 10^6};
muerre={1,1,206};
epsilon=1;
r0=0.01;
archi=OpenRead[name];
q=ReadList[archi,Byte];
Close[archi];
a=Dimensions[q]
p=Table[{q[[i]]+q[[i+1]]*256},{q[[i+2]]+q[[i+3]]*256},{i,1,a[[1]],4}]
q=p*(1/256.);
b=Dimensions[q];
d=b[[1]]
h=Table[q[[i,1,1]],{i,d}];
v=Table[-q[[i,2,1]],{i,d}];
p1=ListPlot[Table[{h[[i]],v[[i]]},{i,1,3}],
Prolog->AbsolutePointSize[5],PlotStyle->RGBColor[1,0,0]]
p2=ListPlot[Table[{h[[i]],v[[i]]},{i,4,4}],
Prolog->AbsolutePointSize[5],PlotStyle->RGBColor[0,0,1]]
p3=ListPlot[Table[{h[[i]],v[[i]]},{i,5,d}],
Prolog->AbsolutePointSize[5],PlotStyle->RGBColor[0,1,0]]
Show[p1,p2,p3]
imp=Table[Impedancia[sigma[[i]],muerre[[i]],epsilon,{r1,r2,l1,l2,n},f},{i,1,3}];
r=Table[Re[imp[[i]]],{i,1,3}];
x=Table[Im[imp[[i]]],{i,1,3}];
c1=ListPlot[Table[{r[[i]],x[[i]]},{i,1,3}],
Prolog->AbsolutePointSize[5],PlotStyle->RGBColor[1,0,0]]
mhv={ {h[[1]],v[[1]],1},{h[[dato1]],v[[dato1]],1},{h[[dato2]],v[[dato2]],1} };
mrx={ {r[[1]],x[[1]],1},{r[[2]],x[[2]],1},{r[[3]],x[[3]],1} };
t=Inverse[mhv].mrx
mrx2=Table[{h[[i]],v[[i]],1}.t,{i,1,d}];
mrx3=Table[{mrx2[[i,1]],mrx2[[i,2]]},{i,1,d}];
imp2=Table[{mrx3[[i,1]]+I mrx3[[i,2]]},{i,1,d}]

```

APÉNDICE IV***Programa para calcular conductividad eléctrica***

```

mux=15
mx=2.036 10^6;
mn=5.544 10^5;
paso=1;
pr=(mx+mn)/2
ix=imp2[[mux,1]]
ir=Impedancia[pr,1,1,{r1,r2,l1,l2,n},f]
While[(mx-mn)/mn>.001,If[Abs[ir-I]<Abs[ix-I],mn=pr,mx=pr];
pr=(mx+mn)/2;paso++;
ir=Impedancia[pr,1,1,{r1,r2,l1,l2,n},f]]
pr//N
(mx-mn)/2//N
paso

```

APÉNDICE V***Programa para calcular permeabilidad magnética relativa***

```

mux=6
conductividad=1388160
mx=1000;
mn=1;
paso=1;
pr=(mx+mn)/2
base=Impedancia[conductividad,1,1,{r1,r2,l1,l2,n},f]
ix=imp2[[mux,1]]
ir=Impedancia[conductividad,pr,1,{r1,r2,l1,l2,n},f]
While[(mx-mn)/mn>.001,If[Abs[ir-base]<Abs[ix-base],mn=pr,mx=pr];
pr=(mx+mn)/2;paso++;
ir=Impedancia[conductividad,pr,1,{r1,r2,l1,l2,n},f]]
pr//N
(mx-mn)/2//N
paso

```

APÉNDICE VI***Tablas de los ensayos de corrientes inducidas***

En las todas las tablas de este apéndice, la primer columna corresponde al número de muestra en la serie y la cabeza de columna a la serie ensayada. La columna 2 y 3 corresponden a la media aritmética de las componentes de la impedancia normalizada experimental y las columnas 4 y 5 a la desviación estándar, calculadas con los valores obtenidos en los veinte ensayos realizados a cada serie de aceros inoxidables. Las columnas 6 y 7 muestran la relación porcentual entre desviación estándar y media aritmética.

Tabla VI.I

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 347 a 60 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0
SS 347						
aire	-	1.0000	0,00E+00	0,00E+00		
p5	0,0569	0,9620	5,50E-04	4,08E-04	1,0%	0,0%
p4	0,0999	0,8930	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0471	1,3300	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0190	1,4000	4,42E-04	7,62E-03	2,3%	0,5%
1	0,0137	1,4000	5,94E-04	7,09E-03	4,3%	0,5%
2	0,0186	1,4000	6,01E-04	7,11E-03	3,2%	0,5%
3	0,0204	1,3900	7,45E-04	6,66E-03	3,7%	0,5%
4	0,0481	1,3200	8,62E-04	7,20E-03	1,8%	0,5%
5	0,0700	1,2400	9,16E-04	7,61E-03	1,3%	0,6%
6	0,0822	1,1300	1,08E-03	4,10E-03	1,3%	0,4%
7	0,0818	1,1100	1,22E-03	3,82E-03	1,5%	0,3%
8	0,0864	1,0100	1,64E-03	2,17E-03	1,9%	0,2%
9	0,0860	1,0100	1,45E-03	1,67E-03	1,7%	0,2%
11	0,0888	0,9170	1,73E-03	1,28E-03	1,9%	0,1%

Tabla VI.2

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 347 a 90 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
■ 347						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0545	0,9400	4,46E-04	4,81E-04	0,8%	0,1%
p4	0,1060	0,8610	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0555	1,3200	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0229	1,4000	6,17E-04	5,77E-03	2,7%	0,4%
1	0,0177	1,4100	6,09E-04	5,83E-03	3,4%	0,4%
2	0,0227	1,4000	7,99E-04	5,33E-03	3,5%	0,4%
3	0,0252	1,3900	8,19E-04	4,68E-03	3,3%	0,3%
4	0,0536	1,3100	1,11E-03	5,82E-03	2,1%	0,4%
5	0,0743	1,2200	1,01E-03	5,94E-03	1,4%	0,5%
6	0,0835	1,1100	9,02E-04	3,22E-03	1,1%	0,3%
7	0,0823	1,0900	9,18E-04	2,79E-03	1,1%	0,3%
8	0,0873	0,9880	1,44E-03	1,60E-03	1,6%	0,2%
9	0,0870	0,9840	1,17E-03	1,57E-03	1,3%	0,2%
11	0,0925	0,8880	1,49E-03	1,36E-03	1,6%	0,2%

Tabla VI.3

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 347 a 120 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 347						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0591	0,9290	4,17E-04	5,31E-04	0,7%	0,1%
p4	0,1080	0,8370	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0620	1,3100	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0320	1,3900	6,40E-04	6,16E-03	2,0%	0,4%
1	0,0265	1,4000	6,30E-04	6,44E-03	2,4%	0,5%
2	0,0317	1,3900	7,79E-04	6,24E-03	2,5%	0,4%
3	0,0338	1,3900	7,61E-04	5,49E-03	2,3%	0,4%
4	0,0621	1,3000	1,00E-03	6,75E-03	1,6%	0,5%
5	0,0830	1,2100	6,86E-04	5,03E-03	0,8%	0,4%
6	0,0924	1,0900	1,16E-03	3,50E-03	1,3%	0,3%
7	0,0910	1,0700	1,31E-03	2,93E-03	1,4%	0,3%
8	0,0940	0,9670	1,67E-03	1,45E-03	1,8%	0,1%
9	0,0933	0,9630	1,44E-03	1,25E-03	1,5%	0,1%
11	0,0949	0,8670	1,55E-03	1,79E-03	1,6%	0,2%

Tabla VI.4

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 347 a 240 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv. estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 347						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0683	0,9000	3,88E-04	7,37E-04	0,6%	0,1%
p4	0,1020	0,7820	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0797	1,2800	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0546	1,3700	9,81E-04	8,43E-03	1,8%	0,6%
1	0,0493	1,3900	7,22E-04	5,43E-03	1,5%	0,4%
2	0,0546	1,3700	6,93E-04	5,75E-03	1,3%	0,4%
3	0,0552	1,3700	7,01E-04	7,46E-03	1,3%	0,5%
4	0,0812	1,2700	1,19E-03	7,04E-03	1,5%	0,6%
5	0,0996	1,1600	2,11E-03	7,39E-03	2,1%	0,6%
6	0,1050	1,0300	1,70E-03	3,82E-03	1,6%	0,4%
7	0,1040	1,0100	1,65E-03	2,68E-03	1,6%	0,3%
8	0,1010	0,9140	1,84E-03	1,40E-03	1,8%	0,2%
9	0,1010	0,9100	1,80E-03	2,05E-03	1,8%	0,2%
11	0,0952	0,8180	1,99E-03	3,00E-03	2,1%	0,4%

Tabla VI.5

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 316 a 60 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv. estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
AISI 316						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0571	0,9620	8,39E-04	6,56E-04	1,5%	0,1%
p4	0,0999	0,8930	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0471	1,3300	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0832	1,1900	1,40E-03	4,79E-03	1,7%	0,4%
1	0,0826	1,2000	1,03E-03	4,77E-03	1,2%	0,4%
2	0,0838	1,1900	7,51E-04	3,24E-03	0,9%	0,3%
3	0,0853	1,1800	1,68E-03	3,70E-03	2,0%	0,3%
4	0,0926	1,0800	1,01E-03	2,74E-03	1,1%	0,3%
5	0,0925	1,0200	1,54E-03	2,13E-03	1,7%	0,2%
6	0,0891	0,9640	1,73E-03	1,04E-03	1,9%	0,1%
7	0,0891	0,9560	1,60E-03	1,41E-03	1,8%	0,1%
8	0,0882	0,9380	1,48E-03	1,12E-03	1,7%	0,1%
9	0,0888	0,9350	1,88E-03	1,05E-03	2,1%	0,1%
10	0,0864	0,9220	1,67E-03	1,44E-03	1,9%	0,2%

Tabla VI.6

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 316 a 90 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 316	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0547	0,9400	6,49E-04	7,29E-04	1,2%	0,1%
p4	0,1060	0,8610	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0555	1,3200	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0812	1,1600	1,14E-03	4,10E-03	1,4%	0,4%
1	0,0811	1,1800	8,30E-04	3,67E-03	1,0%	0,3%
2	0,0824	1,1600	5,56E-04	2,96E-03	0,7%	0,3%
3	0,0834	1,1500	1,45E-03	2,94E-03	1,7%	0,3%
4	0,0926	1,0600	7,18E-04	2,83E-03	0,8%	0,3%
5	0,0933	0,9900	1,19E-03	1,82E-03	1,3%	0,2%
6	0,0912	0,9370	1,44E-03	1,04E-03	1,6%	0,1%
7	0,0912	0,9280	1,32E-03	1,53E-03	1,4%	0,2%
8	0,0907	0,9090	1,04E-03	1,07E-03	1,1%	0,1%
9	0,0913	0,9060	1,50E-03	1,15E-03	1,6%	0,1%
10	0,0895	0,8940	1,28E-03	1,25E-03	1,4%	0,1%

Tabla VI.7

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 316 a 120 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 316	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0593	0,9290	8,24E-04	9,53E-04	1,4%	0,1%
p4	0,1080	0,8370	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,062	1,31	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,0934	1,1400	1,41E-03	3,96E-03	1,5%	0,3%
1	0,0934	1,1600	1,10E-03	3,77E-03	1,2%	0,3%
2	0,0944	1,1400	7,26E-04	3,18E-03	0,8%	0,3%
3	0,0955	1,1300	1,70E-03	2,57E-03	1,8%	0,2%
4	0,1020	1,0300	9,47E-04	2,96E-03	0,9%	0,3%
5	0,1000	0,9670	1,47E-03	1,97E-03	1,5%	0,2%
6	0,0960	0,9160	1,72E-03	1,36E-03	1,8%	0,1%
7	0,0958	0,9070	1,49E-03	1,74E-03	1,6%	0,2%
8	0,0946	0,8890	1,31E-03	1,61E-03	1,4%	0,2%
9	0,0950	0,8860	1,80E-03	1,73E-03	1,9%	0,2%
10	0,0924	0,8740	1,62E-03	1,82E-03	1,8%	0,2%

Tabla VI.8

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 316 a 240 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 316						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0685	0,9000	1,04E-03	1,59E-03	1,5%	0,2%
p4	0,1020	0,7820	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0797	1,2800	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
0	0,1160	1,0900	2,37E-03	4,24E-03	2,0%	0,4%
1	0,1160	1,1100	1,58E-03	3,81E-03	1,4%	0,3%
2	0,1160	1,0900	9,65E-04	3,66E-03	0,8%	0,3%
3	0,1170	1,0800	2,82E-03	2,10E-03	2,4%	0,2%
4	0,1140	0,9750	1,29E-03	3,60E-03	1,1%	0,4%
5	0,1080	0,9100	2,13E-03	2,97E-03	2,0%	0,3%
6	0,0993	0,8640	2,54E-03	2,86E-03	2,6%	0,3%
7	0,0990	0,8560	1,57E-03	2,61E-03	1,6%	0,3%
8	0,0962	0,8400	1,76E-03	2,58E-03	1,8%	0,3%
9	0,0971	0,8350	2,44E-03	3,42E-03	2,5%	0,4%
10	0,0928	0,8270	2,07E-03	3,53E-03	2,2%	0,4%

Tabla VI.9

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 304 a 60 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
SS 304						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0569	0,9620	7,40E-04	7,18E-04	1,3%	0,1%
p4	0,0999	0,8930	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0471	1,3300	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
2	0,0246	1,3800	6,26E-04	9,49E-03	2,5%	0,7%
3	0,0267	1,3800	5,30E-04	1,05E-02	2,0%	0,8%
4	0,0246	1,3900	9,45E-04	9,96E-03	3,8%	0,7%
6	0,0604	1,2900	9,88E-04	1,08E-02	1,6%	0,8%
7	0,0831	1,1200	1,37E-03	4,69E-03	1,6%	0,4%
8	0,0835	1,1100	7,91E-04	4,23E-03	0,9%	0,4%
9	0,0867	1,0400	1,13E-03	2,54E-03	1,3%	0,2%
10	0,0882	0,9810	1,00E-03	1,34E-03	1,1%	0,1%
11	0,0891	0,9280	1,60E-03	1,49E-03	1,8%	0,2%
12	0,0883	0,9210	2,05E-03	1,67E-03	2,3%	0,2%

Tabla VI.10

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 304 a 90 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
SS 304	R/ωLo	X/ωLo	R/ωLo	X/ωLo	R/ωLo	X/ωLo
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		
p5	0,0545	0,9410	6,02E-04	6,55E-04	1,1%	0,1%
p4	0,1060	0,8610	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0555	1,3200	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
2	0,0283	1,3800	6,97E-04	6,44E-03	2,5%	0,5%
3	0,0302	1,3800	7,27E-04	7,03E-03	2,4%	0,5%
4	0,0282	1,3800	9,22E-04	6,52E-03	3,3%	0,5%
6	0,0641	1,2700	1,06E-03	7,66E-03	1,7%	0,6%
7	0,0846	1,0900	1,09E-03	3,38E-03	1,3%	0,3%
8	0,0849	1,0900	9,49E-04	2,62E-03	1,1%	0,2%
9	0,0875	1,0200	1,36E-03	1,56E-03	1,6%	0,2%
10	0,0901	0,9540	1,05E-03	1,47E-03	1,2%	0,2%
11	0,0923	0,8990	1,42E-03	1,55E-03	1,5%	0,2%
12	0,0918	0,8920	1,80E-03	1,94E-03	2,0%	0,2%

Tabla VI.11

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 304 a 120 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv.estandar/media %	
SS 304	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo	R/ ω Lo	X/ ω Lo
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0589	0,9290	7,84E-04	8,91E-04	1,3%	0,1%
p4	0,1080	0,8370	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0620	1,3100	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
2	0,0375	1,3700	7,62E-04	6,37E-03	2,0%	0,5%
3	0,0395	1,3700	7,40E-04	7,66E-03	1,9%	0,6%
4	0,0375	1,3800	1,10E-03	7,01E-03	2,9%	0,5%
6	0,0735	1,2600	1,12E-03	7,30E-03	1,5%	0,6%
7	0,0932	1,0700	1,22E-03	3,18E-03	1,3%	0,3%
8	0,0936	1,0700	1,25E-03	2,48E-03	1,3%	0,2%
9	0,0952	0,9970	1,60E-03	2,01E-03	1,7%	0,2%
10	0,0957	0,9330	1,15E-03	1,50E-03	1,2%	0,2%
11	0,0955	0,8790	1,64E-03	1,90E-03	1,7%	0,2%
12	0,0943	0,8720	1,33E-03	1,64E-03	1,4%	0,2%

Tabla VI.12

Componentes de la impedancia normalizada. Serie AISI 304 a 240 kHz

muestra	media aritmética		desviación estandar		desv. estandar/media %	
	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0
SS 304						
aire	-	1,0000	0,00E+00	0,00E+00		0,0%
p5	0,0683	0,9000	1,11E-03	1,55E-03	1,6%	0,2%
p4	0,1020	0,7820	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
ppm	0,0797	1,2800	0,00E+00	0,00E+00	0,0%	0,0%
2	0,0604	1,3500	1,02E-03	8,91E-03	1,7%	0,7%
3	0,0627	1,3500	1,07E-03	5,82E-03	1,7%	0,4%
4	0,0603	1,3600	1,06E-03	6,37E-03	1,8%	0,5%
6	0,0934	1,2200	1,89E-03	8,36E-03	2,0%	0,7%
7	0,1050	1,0200	1,55E-03	3,22E-03	1,5%	0,3%
8	0,1060	1,0100	1,88E-03	3,76E-03	1,8%	0,4%
9	0,1050	0,9430	2,41E-03	2,53E-03	2,3%	0,3%
10	0,1010	0,8800	1,49E-03	1,49E-03	1,5%	0,2%
11	0,0959	0,8310	1,65E-03	2,58E-03	1,7%	0,3%
12	0,0948	0,8240	2,73E-03	4,00E-03	2,9%	0,5%

APÉNDICE VII

Tablas de los ensayos por Difracción de Rayos X

En las Tablas VII.1, VII.2 y VII.3, la primer columna corresponde al número de muestra, las columnas 2 a 5 son los porcentajes en peso de la fase γ obtenidos en cada zona analizada; la columna 6 al promedio de los valores de las 4 columnas anteriores y la columna 7 al % en peso de α' .

Tabla VII.1

Contenido de martensita. Serie AISI 347 con RX

MUESTRA	% GAMMA				% ALFA'	
SS 347	220 _{γ} - 200 _{α}	220 _{γ} - 211 _{α}	311 _{γ} - 200 _{α}	311 _{γ} - 211 _{α}	Media Arit.	rayos x
0	2	5	0	1	2	98
1	2	3	0	1	1	99
2	10	9	0	2	5	95
3	5	5	0	1	3	97
4	31	27	9	10	19	81
5	55	51	33	29	42	58
6	78	74	66	52	67	33
7	82	81	78	54	74	26
8	95	91	94	61	85	15
9	95	92	93	81	90	10
11	100	99	100	97	99	1

Tabla VII.2

Contenido de martensita. Serie AISI 316 con RX

MUESTRA	% GAMMA				% ALFA'	
SS 316	220 _{γ} - 200 _{α}	220 _{γ} - 211 _{α}	311 _{γ} - 200 _{α}	311 _{γ} - 211 _{α}	Media Arit.	rayos x
0	88	92	81	77	85	15
1	69	92	84	76	80	20
2	73	94	85	80	83	17
3	74	95	87	82	84	16
4	79	98	100	90	92	8
5	81	98	100	92	93	7
6	82	99	100	96	94	6
7	96	98	98	94	97	3
8	98	100	100	95	98	2
9	98	99	100	94	98	2
10	98	100	100	100	99	1

Tabla VII.3

Contenido de martensita. Serie AISI 304 con RX

MUESTRA		% GAMMA				% ALFA
SS 304	220 _γ - 200 _α	220 _γ - 211 _α	311 _γ - 200 _α	311 _γ - 211 _α	Media Arit.	rayos x
2	18	27	2	4	13	87
3	17	26	2	7	13	87
4	16	23	2	5	11	89
6	49	62	21	28	40	60
7	73	81	52	59	66	34
8	72	81	51	59	66	34
9	74	93	80	82	82	18
10	97	97	97	95	97	3
11	98	96	100	97	98	2
12	100	97	98	96	98	2
13	35	48	14	22	30	70
14	72	79	48	56	64	36
15	100	98	100	89	97	3
16	99	99	100	92	97	3

APÉNDICE VIII

Método magnético para medir contenido de martensita

(Autores: J. Marengo y P. Alvarez [88])

El método utilizado por J. Marengo y P. Alvarez, según lo descrito en [88], consiste de dos pasos:

1. Calibración del instrumento: se estableció que para una muestra de hierro puro (100% ferrita δ), cuyo momento magnético de saturación (M_{Fe}) es de 222 emu/g, el instrumento indicaba 196 mV (L_{Fe}). Luego, en base a las composiciones de cada acero (ver Tabla 3.1) y las contribuciones magnéticas de los tres elementos principales de cada aleación (ver Tabla VIII.1), se calcularon los M_k , para una muestra teórica 100% martensítica del acero k (ver Tabla VIII.2), a partir de:

$$M_k = \sum_{j=1}^q f_j M_j$$

donde q es el número de elementos que componen el acero, f_j es la fracción del j -ésimo elemento en el acero k , M_j es el momento magnético de saturación del elemento j .

Con estos valores M_k , se estimó cual sería la lectura (L_k) del instrumento con estas muestras teóricas 100% martensíticas (ver Tabla VIII.2), utilizando:

$$L_k = M_k \frac{L_{Fe}}{M_{Fe}}$$

2. Cálculo del contenido de α' : con los valores L_k calculados en el punto anterior, correspondientes a muestras hipotéticamente 100% martensíticas y las lecturas (L) obtenidos a partir de ensayar cada muestra de cada serie k , se calcula el porcentaje de martensita de cada muestra con la fórmula:

$$\% \alpha' = L \frac{100\%}{L_k}$$

En las Tablas VIII.1 y VIII.2 se transcriben los valores obtenidos por dichos autores.

Tabla VIII.1

Propiedades utilizadas de los componentes principales de los aceros estudiados [88]

	Cromo	Níquel	Hierro
momento magnético de saturación [emu/g]	133	75	222

Tabla VIII.2

Propiedades calculadas de los aceros estudiados [88]

	347	304	316
momento magnético de saturación [emu/g]	179,0	178,4	173,5
lectura del instrumento para muestras teóricamente 100% martensíticas [mV]	158,0	157,5	153,2

APÉNDICE IX

Tablas de la relación entre Z y %

En la primera columna de estas tablas se ubican los números de designación de las probetas, en la segunda columna el valor medido magnéticamente [88], en la tercera columna se encuentra el contenido de martensita medido con rayos X, en las demás columnas se presentan los valores de resistencia normalizada ($R/\omega L_0$) y reactancia normalizada ($X/\omega L_0$) para cada una de las cuatro frecuencias de ensayo.

Tabla IX.1

Resumen de los valores de impedancia de las probetas de la serie AISI 347, calculados a partir de ensayos por corrientes inducidas.

MUESTRA	% ALFA		60 kHz		90 kHz		120 kHz		240 kHz	
	magnético	rayos x	$R/\omega L_0$	$X/\omega L_0$	$R/\omega L_0$	$X/\omega L_0$	$R/\omega L_0$	$X/\omega L_0$	$R/\omega L_0$	$X/\omega L_0$
0	69	98	0,019	1,400	0,023	1,400	0,032	1,390	0,055	1,370
1	77	99	0,014	1,400	0,018	1,410	0,027	1,400	0,049	1,390
2	73	95	0,019	1,400	0,023	1,400	0,032	1,390	0,055	1,370
3	75	97	0,020	1,390	0,025	1,390	0,034	1,390	0,055	1,370
4	58	81	0,048	1,320	0,054	1,310	0,062	1,300	0,081	1,270
5	43	58	0,070	1,240	0,074	1,220	0,083	1,210	0,100	1,160
6	21	33	0,082	1,130	0,084	1,110	0,092	1,090	0,105	1,030
7	15	26	0,082	1,110	0,082	1,090	0,091	1,070	0,104	1,010
8	6	15	0,086	1,010	0,087	0,988	0,094	0,967	0,101	0,914
9	3	10	0,086	1,010	0,087	0,984	0,093	0,963	0,101	0,910
11	0	1	0,089	0,917	0,093	0,888	0,095	0,867	0,095	0,818

Tabla IX.2

Resumen de los valores de impedancia de las probetas de la serie AISI 316, calculados a partir de ensayos por corrientes inducidas.

MUESTRA	% ALFA'		60 kHz		90 kHz		120 kHz		240 kHz	
	magnético	rayos x	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0
SS 316										
0		15	0,083	1,190	0,081	1,160	0,093	1,140	0,116	1,090
1	39	20	0,083	1,200	0,081	1,180	0,093	1,160	0,116	1,110
2	44	17	0,084	1,190	0,082	1,160	0,094	1,140	0,116	1,090
3		16	0,085	1,180	0,083	1,150	0,096	1,130	0,117	1,080
4	36	8	0,093	1,080	0,093	1,060	0,102	1,030	0,114	0,975
5	18	7	0,093	1,020	0,093	0,990	0,100	0,967	0,108	0,910
6	9	6	0,089	0,964	0,091	0,937	0,096	0,916	0,099	0,864
7	4	3	0,089	0,956	0,091	0,928	0,096	0,907	0,099	0,856
8		2	0,088	0,938	0,091	0,909	0,095	0,889	0,096	0,840
9	2	2	0,089	0,935	0,091	0,906	0,095	0,886	0,097	0,835
10	1	1	0,086	0,922	0,090	0,894	0,092	0,874	0,093	0,827

Tabla IX.3

Resumen de los valores de impedancia de las probetas de la serie AISI 304, calculados a partir de ensayos por corrientes inducidas.

MUESTRA	% ALFA'		60 kHz		90 kHz		120 kHz		240 kHz	
	magnético	rayos x	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0	R/ ωL_0	X/ ωL_0
SS 304										
2	67	87	0,025	1,380	0,028	1,380	0,038	1,370	0,060	1,350
3	71	87	0,027	1,380	0,030	1,380	0,040	1,370	0,063	1,350
4	69	89	0,025	1,390	0,028	1,380	0,038	1,380	0,060	1,360
6	58	60	0,060	1,290	0,064	1,270	0,074	1,260	0,093	1,220
7	44	34	0,083	1,120	0,085	1,090	0,093	1,070	0,105	1,020
8	21	34	0,084	1,110	0,085	1,090	0,094	1,070	0,106	1,010
9	12	18	0,087	1,040	0,088	1,020	0,095	0,997	0,105	0,943
10	7	3	0,088	0,981	0,090	0,954	0,096	0,933	0,101	0,880
11	4	2	0,089	0,928	0,092	0,899	0,096	0,879	0,096	0,831
12	1	2	0,088	0,921	0,092	0,892	0,094	0,872	0,095	0,824

APÉNDICE X

Presentaciones en reuniones científicas

- **"Método para la evaluación de la conductividad eléctrica y permeabilidad magnética de probetas de acero inoxidable por corrientes inducidas"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **8ª Conferencia sobre Tecnología de Equipamentos - Coteq**, Salvador, Brasil, 7 al 10 de junio de 2005.
- **"Método para la evaluación de la proporción de martensita contenida en probetas de acero inoxidable por corriente inducidas"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **X Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (CONIME 2006)**, Gral. Pacheco, Buenos Aires, 24 y 25 de agosto de 2006.
- **"Non destructive quantification of martensite content in stainless steels"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **NDT 2006 Conference and Exhibition**, London, United Kingdom, 12 al 14 de setiembre de 2006.
- **"Caracterización no destructiva de probetas de acero inoxidable AISI 316"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **PANNDT 2007, 4ª Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos**, Buenos Aires, Argentina, 22 al 26 de octubre del 2007.

Publicaciones con referato

- **"Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **Insight**, Vol 48, N° 1, Gran Bretaña, Enero 2006, pp. 26-29. Publicado por: The British Institute of Non-Destructive Testing (ISSN: 1354-2575).
- **"Caracterización no destructiva de probetas de acero inoxidable AISI 316"**. Autores: Alejandro Lois y Marta Ruch. **PANNDT 2007, 4ª Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos**. (ISBN-978-987-23957-0-4).
<http://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&edit=1&MainSource=46&AuthorID=2080>

REFERENCIAS

- 1) G.J. Fischer, R.J. Maciag, "The wrought stainless steels", cap. 1 en: D. Peckner, I.M. Bernstein (Ed.), "Handbook of stainless steels", McGraw-Hill Book Company, 1977.
- 2) P. Lacombe, G. Béranger, "Structures et diagrammes d'équilibre des diverses nuances d'aciers inoxydables. Conséquences sur leurs traitements thermiques", cap. 2 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 3) J. Apraiz Barreiro, "Aceros especiales y otras aleaciones", Ed. Dossat-Plaza Santa Ana, Madrid, 1975.
- 4) L. Colombier, J. Hochmann, "Aceros inoxidables, aceros refractarios", Ediciones URMO, Bilbao, 1968.
- 5) G. Istrati, "Manual de los aceros inoxidables", Librería y Editorial Alsina, Buenos Aires, 1961.
- 6) R. Castro, "Historique des aciers inoxydables", cap. 1 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 7) J. G. Parr, A. Hanson, "An introduction to stainless steel", American Society for Metals, 1965.
- 8) E.A. Schoefer, "Seventy five years of cast high alloys", Stainless Steel Castings, ASTM STP 756, V.G. Behal y A.S. Melilli (Ed.), American Society for Testing and Materials, pp. 3-10, 1982.
- 9) International Stainless Steel Forum (ISSF), 2006.
<http://www.worldstainless.org/statistics/crude/>
- 10) M. El Wahabi, "Caracterización termomecánica de aceros inoxidables austeníticos AISI-304", ISBN: B.31060-2003/84-688-2343-0, 2003.
- 11) G. Di Caprio, "Gli acciai inossidabili", Hoepli, 3ª Ed., Milano, 1997.
- 12) E. A. Schoefer, "The cast stainless steels", cap. 2 en: D. Peckner, I.M. Bernstein (Ed.), "Handbook of stainless steels", McGraw-Hill Book Company, 1977.
- 13) V. Pedraza, "Aceros Inoxidables. Clasificación y características. Manual I", Centro Nacional para el Desarrollo del Acero Inoxidable, México, 2002.
- 14) R. P. Reed, "Nitrogen in austenitic stainless steels", JOM, pp. 16-21, March 1989.
- 15) H. Giraud, B. Baroux, "Emboutissabilité des aciers inoxydables", cap. 20 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 16) M. A. M. Bourke, J. G. Maldonado, D. Masters, K. Meggers, H.G. Priesmeyer, "Real time measurement by Bragg edge diffraction of the reverse ($\alpha' \rightarrow \gamma$) transformation in a deformed 304 stainless steel", Material Science and Engineering A, Vol. 221, pp. 1-10, 1996.

- 17) M. Stalder, S. Vogel, M. A. M. Bourke, J. G. Maldonado, D. J. Thoma, V. W. Yuan, "Retransformation ($\alpha' \rightarrow \gamma$) kinetics of strain induced martensite in 304 stainless steel", *Material Science and Engineering A*, Vol. 280, pp. 270-281, 2000.
- 18) M. Rouby, P. Blanchard. "Propriétés physiques et mécaniques des aciers et alliages inoxydables", cap. 4 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 19) "Aceros. Capítulos del 1 al 7". CNEA-AC 67/85, Buenos Aires, 1985.
- 20) D. A. Porter, K. E. Easterling. "Phase Transformations in Metals and Alloys". Chapman & Hill, 1992.
- 21) J. C. Bavay, "Aciers inoxydables austénitiques", cap. 16 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 22) G. M. Gordon, "Physical metallurgy of Fe-Cr-Ni alloys", International Conference on Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys. Unieux-Firminy, France. June 12-16, 1973. Published in Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, NACE 5, National Association of Corrosion Engineers, pp. 893-945, 1977.
- 23) C. J. Novak, "Structure and constitution of wrought austenitic stainless steel", cap. 4 en: D. Peckner, I.M. Bernstein (Ed.), "Handbook of stainless steels", McGraw-Hill Book Company, 1977.
- 24) F. B. Pickering, "Physical metallurgical of stainless steel developments", *International Metals Reviews*, Vol. 21, rev. 211, pp. 227-268, 1976.
- 25) P. Alvarez y A. M. Hey, "Endurecimiento por trabajado de aceros inoxidable austeníticos", Informe CNEA-NT 3/83, Buenos Aires, 1983.
- 26) T. Gladman, J. Hammond, W. Marsh, "Austenitic stainless steel for cold forming", *Sheet Metal Industries*, Vol. 51, pp. 219-222, 224, 239, 1974
- 27) K. J. Irvine, T. Gladman, F. B. Pickering, "The strength of austenitic stainless steels", *Journal Iron Steel Institute*, pp. 1017-1028, July 1969.
- 28) D. Peckner, I.M. Bernstein. "Specifications of the stainless steel producing countries", ap. 1 en: D. Peckner, I.M. Bernstein (Ed.), "Handbook of stainless steels", McGraw-Hill Book Company, 1977.
- 29) Guillermo Anteri en comunicación personal, 2007
- 30) D. O'Sullivan, M. Cotterell, I. Meszaros, "The characterization of work-hardened austenitic stainless steel by NDT micro-magnetic techniques", *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 265-269, 2004.
- 31) J. A. Brooks. "Selection of Wrought Austenitic Stainless Steels", *ASM HANDBOOK*, Volume 6, "Welding, Brazing, and Soldering", 1998

- 32) P. J. Cunat, "Soudabilité et métallurgie des soudures", cap. 22 en: P. Lacombe, B. Baroux, G. Béranger (Ed.), "Les aciers inoxydables", Les Éditions de Physique, 1990.
- 33) J. R. Davis (Ed.), "ASM Specialty Handbook Stainless Steels", Davis & Associates, ASM International, 1996.
- 34) D. W. Dietrich, "Magnetically soft materials", ASM HANDBOOK, Volume 2, "Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", 1997.
- 35) K. H. Moyer, "Magnetic materials and properties for powder metallurgy part applications", ASM HANDBOOK, Volume 7, "Powder Metal Technologies and Applications", 1999.
- 36) K. H. J. Buschow, F. R. de Boer, "Physics of magnetism and magnetic materials", Kluwer Academic Publishers, 2004.
- 37) M.A. Willard, G.F. Vander Voort, "Microstructure and domain imaging of magnetic materials", ASM HANDBOOK, Volume 9, "Metallography and Microstructures", 2004.
- 38) S.L. Semiatin, "Piercing of Low-Carbon Steel", ASM HANDBOOK, Volume 14, "Forming and Forging", 1996.
- 39) A. Lindgren, "Magnetic particle inspection", ASM HANDBOOK, Volume 17, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", 1997.
- 40) V. S. Cecco, G. Van Drunnen, F. L. Sharp, "Manual on eddy current method". Vol.1, Chalk River Nuclear Laboratories, 1981.
- 41) H. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods", Wiley-Interscience, 1971.
- 42) "Nondestructive Testing Eddy Current" Classroom training handbook, Zetec, Inc. (1997)
- 43) H. H. Skilling, "Circuitos en Ingeniería Eléctrica", Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V., 1984.
- 44) Y. Le Biham, "Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation", NDT&E International, Vol. 36, pp. 297-302, 2003.
- 45) D. H. S. Cheng, "The Reflected Impedance of a Circular Coil in the Proximity of a Semi-Infinite Medium", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 14, n° 3, pp. 107-116, 1965.
- 46) C. V. Dodd, W. E. Deeds, "Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems", J. Appl. Phys. 39, n° 6, pp 2829-2838, 1968.
- 47) CEREM, Centre d'Études et de Recherches sur les Matériaux. Réf : STA/LCME/RT 3767, Novembre 1998.
- 48) J. R. Reitz, F. J. Milford, "Fundamentos de la teoría electromagnética", Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, 1969.

- 49) J. E. Marsden, A. J. Tromba. "Cálculo Vectorial", Addison Wesley Longman de México, S.A. de C.V., 1998.
- 50) S. Wolfram, "The MATHEMATICA™ Book", Third Edition. Wolfram Media and Cambridge University Press. 1996.
- 51) R. Maeder, "Programming in Mathematica", Addison-Wesley Publishing Co., 1991.
- 52) A. Lois, M. Ruch, "Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing", Insight, Vol. 48, n° 1, pp. 26-29, 2006.
- 53) A. Lois, M. Ruch. "Caracterización no destructiva de probetas de acero inoxidable AISI 316", Proceedings of 4º Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos. 2007.
- 54) R. Muñoz, Informe Técnico N° 48077, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, CEMCOR-CIMM Centro Regional Córdoba, 2004.
- 55) ASTM Standards: E 1004 – 91 Standard Test Method for Electromagnetic (Eddy-Current) Measurements of Electric Conductivity
- 56) J. Lewis, "Physical properties of stainless steels", cap. 19 en: Peckner, D., Bernstein, I.M. (Ed.), "Handbook of Stainless steels", McGraw-Hill, 1997.
- 57) L. Joyanes Aguilar, "Programación en Turbo Pascal. Versiones 4.0, 5.0 y 5.5", Mc Graw-Hill, 1990.
- 58) A. Lois, "Modelización numérica del plano de impedancia para la determinación simultánea en Zircaloy, por corrientes inducidas, de espesores de óxidos y conductividad", Instituto de Tecnología Jorge Sabato, IT/T-59/01, 2001.
- 59) A. Lois, H. Mendonça, M. Ruch, "Conductivity calculations from eddy current measurements on thin specimens", Insight, Vol. 44, n° 5, pp. 279-284, 2002.
- 60) R. Dony, "Grafismo científico con Microordenador de la 2ª a la 3ª dimensión", Masson,s.a., 1986.
- 61) J. L. Devore, "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias", 5ª Edición, Thomson Learning, 2001.
- 62) S. Gil, E. Rodríguez, "Física re-Creativa. Experimentos de Física usando nuevas tecnologías", Prentice Hall, Buenos Aires, 2001.
- 63) D. Kincaid, W. Cheney, "Análisis numérico. Las matemáticas del cálculo científico", Addison-Wesley Iberoamericana, 1994.
- 64) X. Ma, A. J. Peyton, Y. Y. Zhao, "Eddy currents measurements of electrical conductivity and magnetic permeability of porous metals", NDT&E International, Vol. 39, pp. 562-568, 2006.
- 65) P. S. Prevey, "X-Ray Diffraction Residual Stress Techniques", ASM HANDBOOK, Volume 10, "Materials Characterization", 1998.

- 66) H. Kwun, G. L. Burkhardt, "Electromagnetic techniques for residual stress measurements", ASM HANDBOOK, Volume 17, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", 1997.
- 67) Martínez Ripoll, M., Hernández Cano, F. "Cristalografía de rayos X". Instituto de Química-Física "Rocasolano", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ministerio de Educación y Ciencia, Gobierno de España, 2005.
http://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_05.html
- 68) M. Ortiz Albuixech, "Informe Accro 347. Determinación de porcentaje de fases Austenita-Martensita por Difracción de Rayos X", Inf. Téc. UAM-CNEA, 2005.
- 69) P. Rozenak, R. Bergman, "X-ray phase analysis of martensitic transformations in austenitic stainless steel electrochemically charged with hydrogen", Material Science and Engineering A, Vol. 437, pp. 366-378, 2006.
- 70) B. D. Cullity en: M. Cohen (Ed.), "Elements of X-ray Diffraction", 2ª ed., Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1978.
- 71) "Tabla periódica de los elementos", Mawis Producciones.
- 72) W. Kraus, G. Nolze, PowderCell for Windows, Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, version 2.4, 2000.
- 73) M. De Meyer, D. Vanderschueren, K. De Blauwe, B. C. De Cooman, "The characterisation of retained austenite in TRIP steels by X ray diffraction", ISS, 41st Mechanical Working and Steel Processing Conference; Baltimore, MD; USA; 24-27 Oct. 1999, Vol. XXXXVII, pp. 483-491, 1999.
- 74) QNET. Quality Network, Inc., 2007.
http://www.qnetworld.com/material_analysis/3ma.html
- 75) G. Dobmann, M. Kröning, W. Theiner, H. Willems, U. Fiedler, "Nondestructive characterization of materials (ultrasonic and micromagnetic techniques) for strength and toughness prediction and the detection of early creep damage", Nuclear Engineering and Design 157, pp. 137-158. 1992.
- 76) W. L. Rollwitz, "Magabsorption NDE", ASM HANDBOOK, Volume 17, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", 1997.
- 77) Y. Umakoshi, H. Y. Yasuda, "Nondestruction lifetime prediction by magnetic measurements", Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier Ltd., pp. 1-9, 2004.
- 78) C. O. D. Martins, T. R. Strohaecker, A. S. Rocha, T. K. Hirsch, "Comparação entre técnicas de análise de tensões residuais em anéis de rolamento do aço ABNT 52100", Matéria, Vol. 9, nº 1, pp 23-31, 2004.
- 79) A. Vincent, L. Pasco, M. Morin, X. Kleber, M. Delnondedieu, "Magnetic Barkhausen noise from strain-induced martensite during low cycle fatigue of 304L austenitic stainless steel", Acta Materialia, Vol. 53, pp. 4579-4591, 2005.

- 80) M. Zergoug, O. Barkat, G. Kamel, "Barkhausen noise model of microdefect characterization", 3rd MENDT - Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition - 27-30 Nov 2005
- 81) Guang-Ping Zheng, Mo Li, "Dynamics of Barkhausen jumps in disordered ferromagnets", Journal Of Applied Physics, Vol. 92, n° 2, pp. 883-888, 2002
- 82) S. Shanmugham, P.K. Liaw, "Detection and monitoring of fatigue cracks", ASM HANDBOOK, Volume 19, "Fatigue and Fracture", 1997.
- 83) R. E. Beissner, "Magnetic field testing", ASM HANDBOOK, Volume 17, "Nondestructive Evaluation and Quality Control", 1997.
- 84) R. Grimberg, M.L. Craus, A. Andreescu, A. Savin, "Evaluation of fatigue state of Si 3% -Fe sheets based on non-destructive magnetic measurements", Bulgarian Journal of Physics, Vol. 27, n° 4, pp. 101-104, 2000.
- 85) Cajko, F., "Pulse elasto-magnetic measurement of the cylindrical-shaped ferromagnetic specimens", Department of Radiophysics, Comenius University, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Bratislava, Slovak Republic, 2001
- 86) B. Kvasnica, P. Fabo, "Highly precise non-contact instrumentation for magnetic measurement of mechanical stress in low-carbon steel wires", Measurement Science and Technology 7, pp.763-767, 1996
- 87) R. Grimberg, A. Savin, S. Leitoiu, M.L. Craus, "Non-destructive evaluation of boiler tubes by the incremental permeability method", Insight, Vol. 38, n° 9, pp. 650-655, 1996
- 88) J. Marengo, P. Alvarez, "Cuantificación del porcentaje de martensita alfa formado durante el maquinado de aceros inoxidables austeníticos de la serie 3xx", I Congreso de Ensayos No Destructivos para América Latina y el Caribe, San Pablo, Brasil, setiembre de 1986, pp. 537-555, 1986.
- 89) R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, "The Feynman lectures on physics. Mainly electromagnetism and matter.", Addison-Wesley Publishing Co., 1964.
- 90) R. A. Lula, I. M. Bernstein, "Residual and minor elements in stainless steels", cap. 14 en: Peckner, D., Bernstein, I.M. (Ed.), "Handbook of Stainless steels", McGraw-Hill, 1997.
- 91) L. Weber, C. Fischer, A. Mortensen, "On the influence of the shape of randomly oriented, non-conducting inclusions in a conducting matrix on the effective electrical conductivity", Acta Materialia, Vol. 51, pp. 495-505, 2003.
- 92) L. Weber, J. Dorn, A. Mortensen, "On the electrical conductivity of metal matrix composites containing high volume fractions of non-conducting inclusions", Acta Materialia, Vol. 51, pp. 3199-3211, 2003.
- 93) Z. Zurek, "Magnetic monitoring of the fatigue process of the rim material of railway wheel sets", NDT&E International, Vol. 39, pp. 675-679, 2006.

- 94) R. E. Beissner, "Theory of eddy currents in metal matrix composites", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum press, New York, pp. 225-232, 1992.
- 95) B.A. Auld, J.C. Moulder, "Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 18, n° 1, pp. 3-36, 1999.
- 96) E. Uzal, I. Ozkol, M.O. Kaya, "Impedance of a coil surrounding an infinite cylinder with an arbitrary radial conductivity profile", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, n° 1, pp. 213-217, 1998.
- 97) P. Alvarez y A. M. Hey, "Endurecimiento superficial por maquinado en aceros inoxidables austeníticos", Informe CNEA-NT 27/83, Buenos Aires, 1983.
- 98) P. Alvarez, R. Versaci y A. M. Hey, "Endurecimiento superficial por maquinado en aceros inoxidables austeníticos, parte II", Informe CNEA-NT 17/84, Buenos Aires, 1984.
- 99) E. Nagy, V. Mertinger, F. Tranta, J. Sólyom, "Deformation induced martensitic transformation in stainless steels", Material Science and Engineering A, Vol. 378, pp. 308-313, 2004.
- 100) D.T. Hayford, G.E. Kechter, R.J. Davis, T.O. McCanney, "Nondestructive measurement of magnetic permeability", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum press, New York, pp. 1871-1878, 1993.
- 101) W. Theiner, R. Kern, M. Stroh, "Process-integrated nondestructive testing of ground and case hardened parts", PINT NDT – ECNDT, Barcelona, 2002
- 102) Y. Gotoh, N. Takahashi, "Examination of electromagnetic inspection of surface hardness: 3-D non linear FEM analysis considering nonuniform permeability and conductivity", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, n° 4, pp. 2673-2675, 2004.
- 103) V.O. de Haan, P.A. de Jong, "Analytical expressions for transient induction voltage in a receiving coil due to a coaxial transmitting coil over a conducting plate", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, n° 4, pp. 371-378, 2004.
- 104) A. Bénéteau, P. Weisbecker, G. Geandier, E. Aeby-Gautier, B. Appolaire, "Austenitization and precipitate dissolution in high nitrogen steels: an in situ high temperature X-ray synchrotron diffraction analysis using the Rietveld method", Material Science and Engineering A, Vol. 393, pp. 63-70, 2005.
- 105) M. Botshekan, S. Degallaix, Y. Desplanques, "Influence of martensitic transformation on the low-cycle fatigue behaviour of 316LN in stainless steel at 72 K", Material Science and Engineering A 234-236, pp. 463-466, 1997.
- 106) N. Bowler, "Analytical solution for the electric field in a half space conductor due to alternating current injected at the surface", Journal of Applied Physics, Vol. 95, n° 1, pp. 344-348, 2004.

- 107) B. Ravi Kumar, A.K. Singh, B. Mahato, P.K. De, N.R. Bandyopadhyay, D.K. Bhattacharya, "Deformation induced transformation textures in metastable austenitic stainless steel", *Material Science and Engineering A*, Vol. 429, pp. 205-211, 2006.
- 108) B. Ravi Kumar, A.K. Singh, Samar Das, D.K. Bhattacharya, "Cold rolling texture in AISI 304 stainless steel", *Material Science and Engineering A*, Vol. 364, pp. 132-139, 2004.
- 109) A.K. De, D.C. Murdock, M.C. Mataya, J.G. Speer, D.K. Mathlock, "Quantitative measurement of deformation induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 1445-1449, 2004.
- 110) T.P. Theodoulidis, T.D. Tsiboukis, E.E. Kriesis, "Analytical solutions in eddy current testing of layered metals with continuous conductivity profiles", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, n° 3, pp. 2254-2260, 1995.
- 111) C.C. Tai, J.H. Rose, J.C. Moulder, "Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 67, n° 11, pp. 3965-3972, 1996.