

Materials Research & Technology

Soluciones Avanzadas con Métodos Electromagnéticos de Inspección

Raul M Leon
Mechanical Engineer – MBA
NDT Innovations, Inc
Materials Research & Technology



Research & Innovation Center

Nuestro Plan:

Desarrollar Centros dedicados a la Investigación y Desarrollo que sirvan como vehículos para realizar investigación de manera sostenible, colaborativa y multidisciplinaria entre Material Research & Technology y el resto de la comunidad científica dedicada a la investigación en el área de materiales.

Nuestra promesa:

Ser el lugar de nacimiento de Conocimiento, Innovación y de Importantes Desarrollos Tecnológicos, y al mismo tiempo fomentando la Cultura, las Ciencias y las Artes.

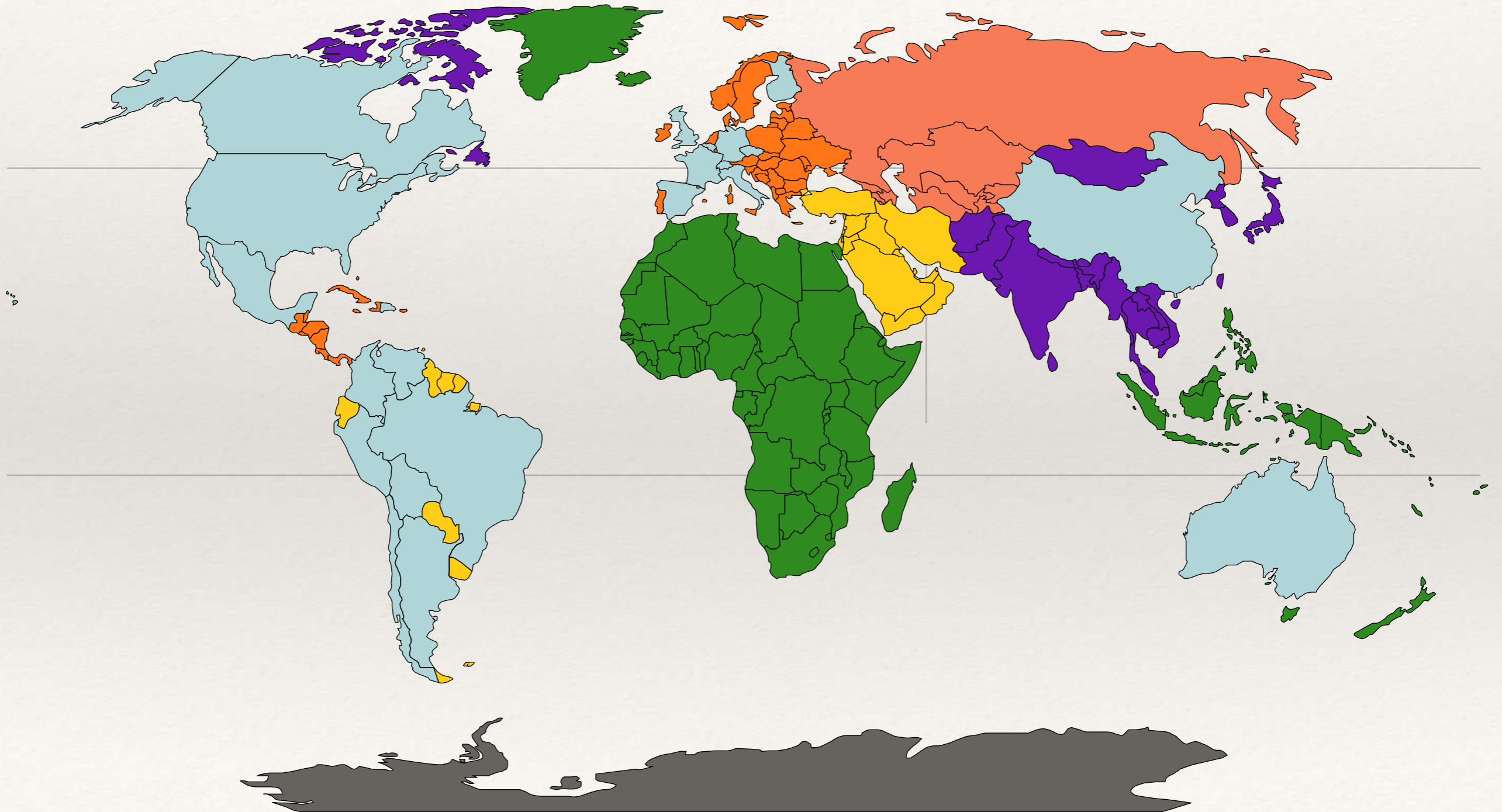
Non Destructive Testing

(Herramientas de Diagnóstico)

- † Se denomina Non Destructive Testing o NDT a un grupo de métodos y técnicas analíticas por la ciencia y la industria para evaluar las propiedades de los materiales, los componentes y sistemas sin causar daño alguno a los mismos.
- † Debido a que los Ensayos No Destructivos no alteran de modo permanente al artículo que esta siendo inspeccionado, son métodos y técnicas valiosas que ayudan a ahorrar dinero y tiempo en la evaluación de productos, el mantenimiento y la investigación.
- † Los métodos mas comunes de Ensayos No Destructivos son: El ultrasonido, los rayos X, el método de inspección visual (Incluye la endoscopia industrial), las técnicas de inspección electromagnéticas y los métodos de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas.

Presencia de NDT Innovations (18 años)

Color Celeste



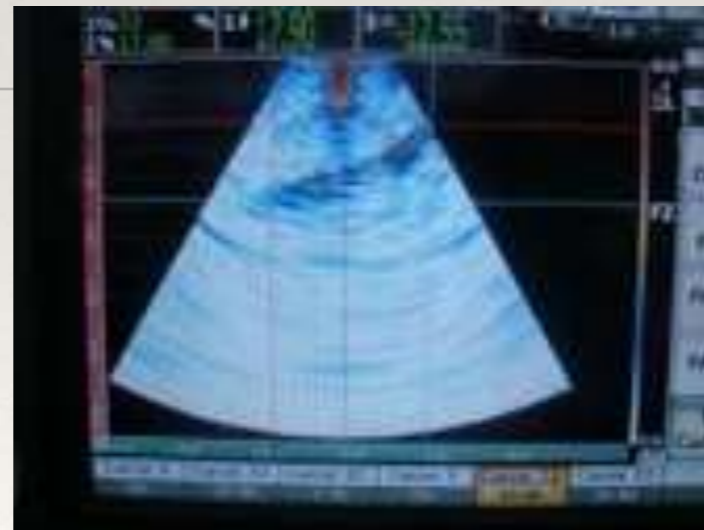
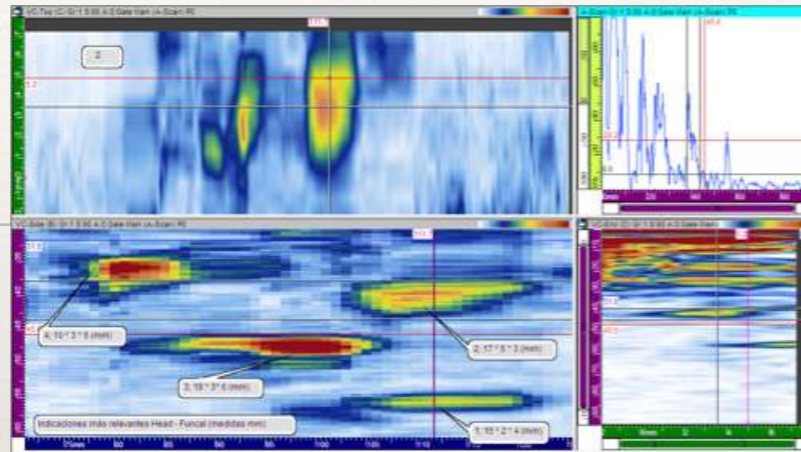
Inspección Ultrasonica en Estructuras, Hidroeléctricas, Minería, Gas y Petróleo

- † Inspección de soldaduras por AUT del muelle de la Planta Melchorita Pioneros en usar AUT en Estructuras según AWS D1.1
- † Inspección por AUT de soldaduras de Hidroeléctricas de Platanal, Huanza, etc.

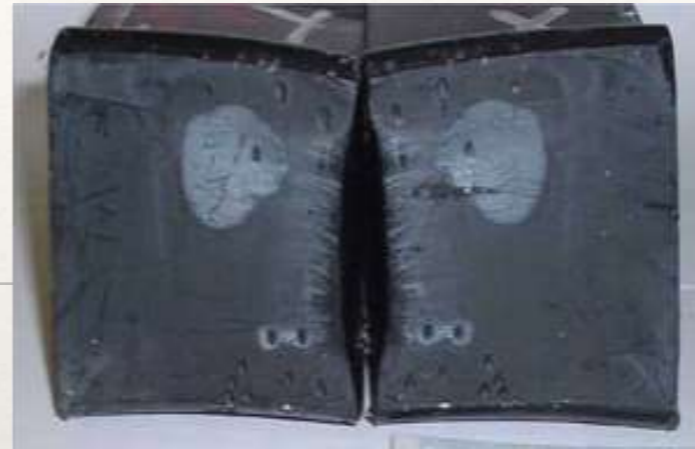
- † Texas (Exxon Mobil) (Pioneros en EEUU al usar AUT para inspeccionar grandes recipientes complejos de pared gruesa)
- † Gasoductos según API 1104.
- † Molinos de Bolas y otras fundiciones para Fluor, Jacobs Engineering, FMI (Climax, Cerro Verde) Barrick, Toromocho, Antamina, FL Smidth, Metso Minerals, etc. (Percibidos como únicos en el mercado)

- † Inspección de recipientes ASME de pared gruesa y geometría compleja en USA para Shell y diversos proyectos en América Latina.
- † Inspección del mayor gasoducto en Australia por ultrasonido Avanzado
- † Desarrollo de sistemas avanzados de inspección para gasoductos de HDPE por métodos ultrasónicos y Electromagnéticos.

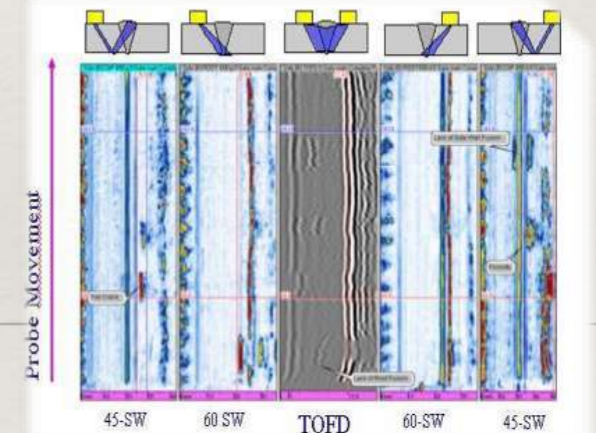
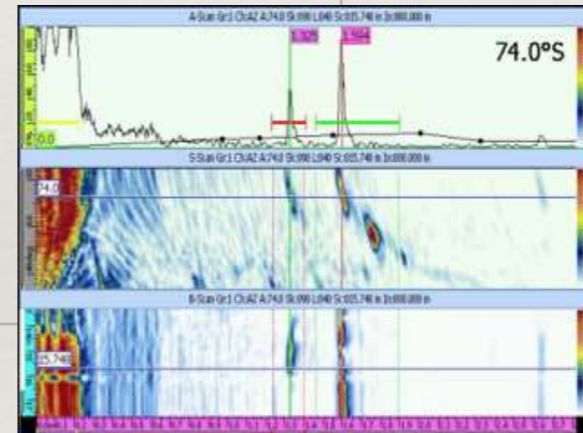
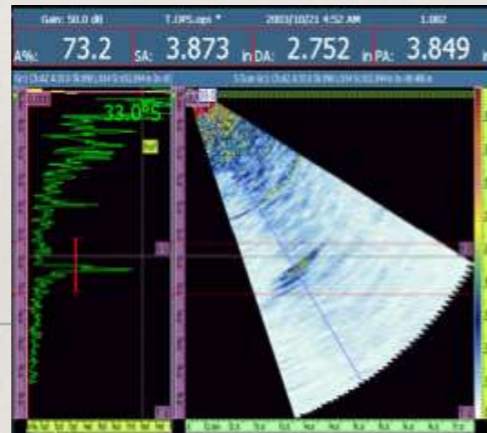
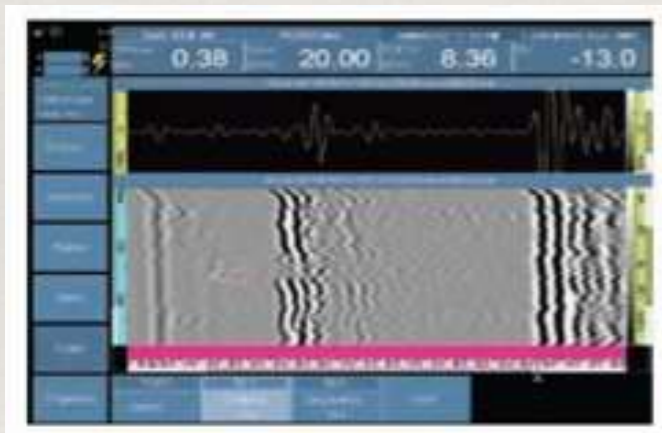
Fundiciones Inspeccionadas en las Américas, Europa, Asia y Oceanía



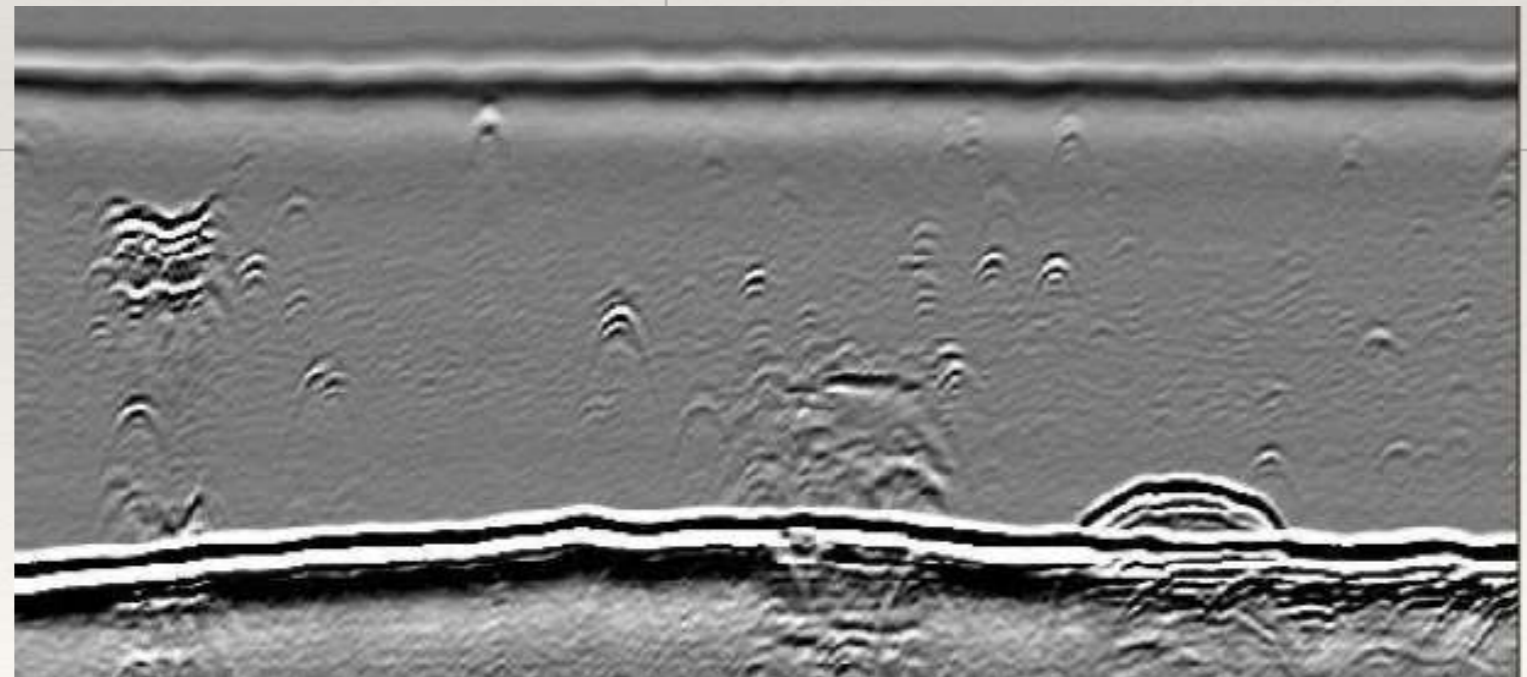
Posición de Ventaja: TOFD en HDPE



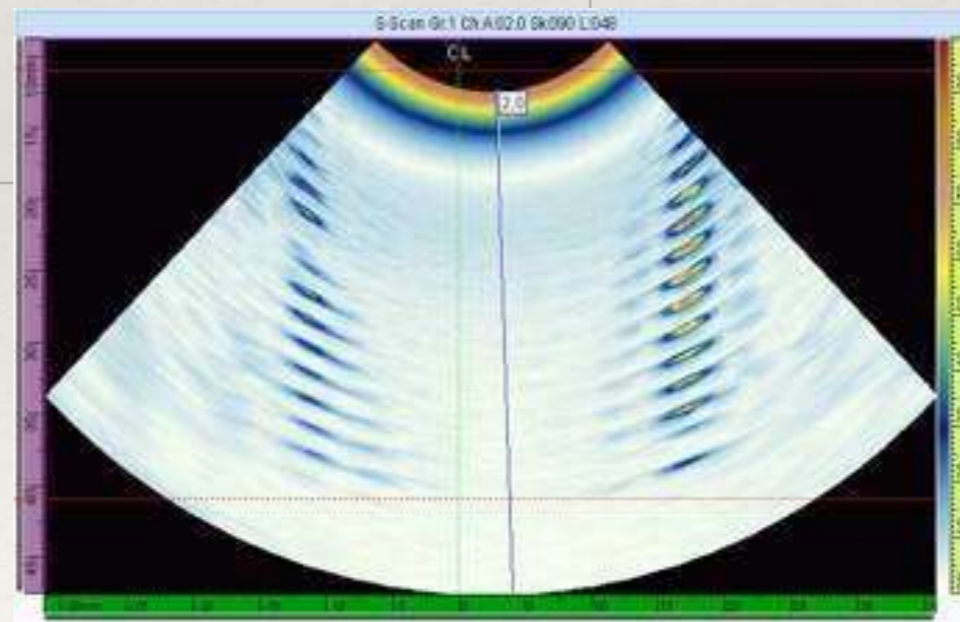
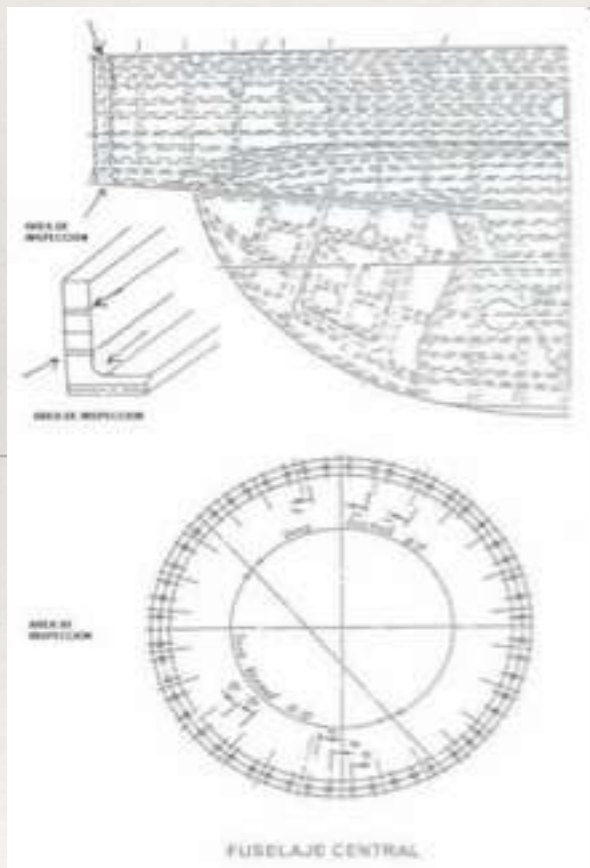
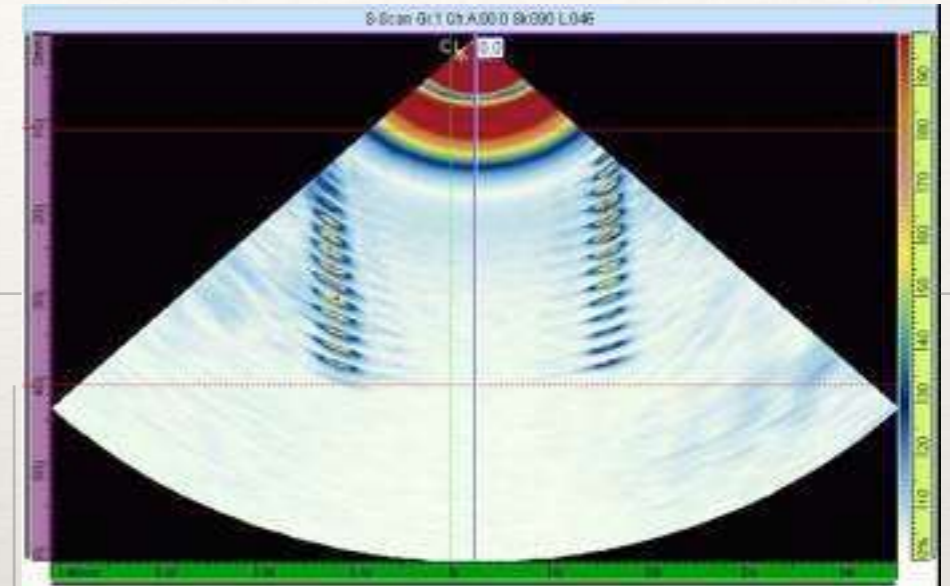
Avances en la Industria Petrolera, Minera y en Hidroeléctricas



Tecnología AUT Desarrollada para Inspeccionar Soldaduras

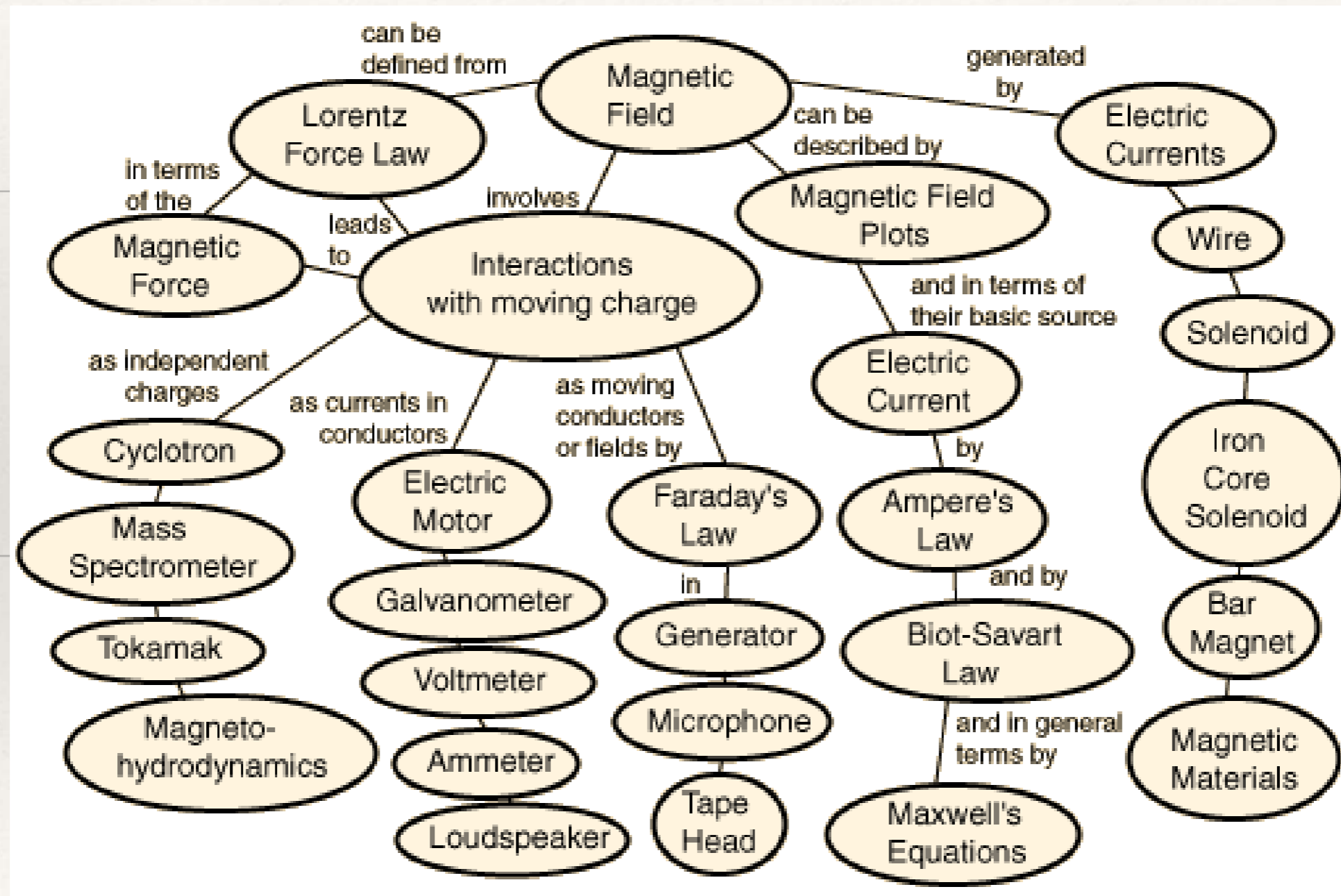


Desarrollo de una nueva solución para inspeccionar pernos de Helicópteros (Emergencia de la DGAC)



Electromagnetic Testing

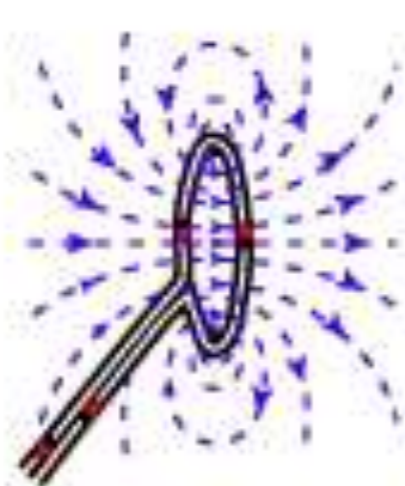
Contribuciones



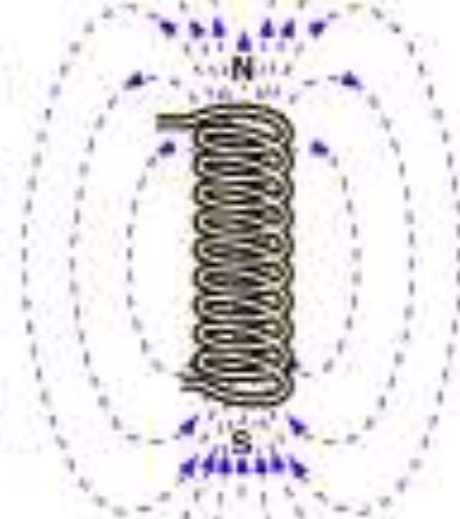
Magnetismo



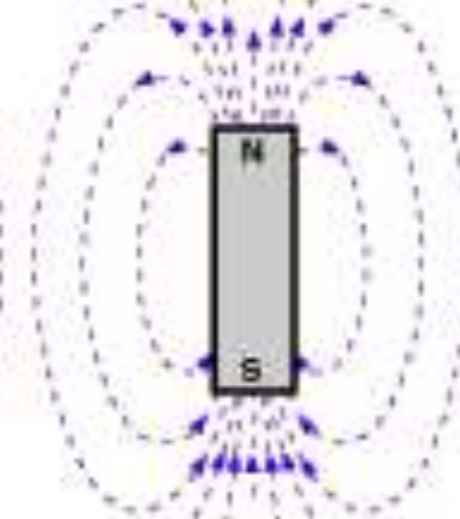
Current in wire



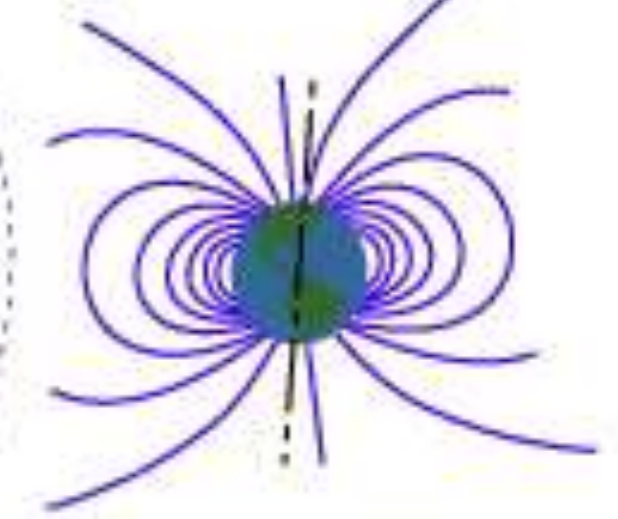
Loop of wire



Solenoid



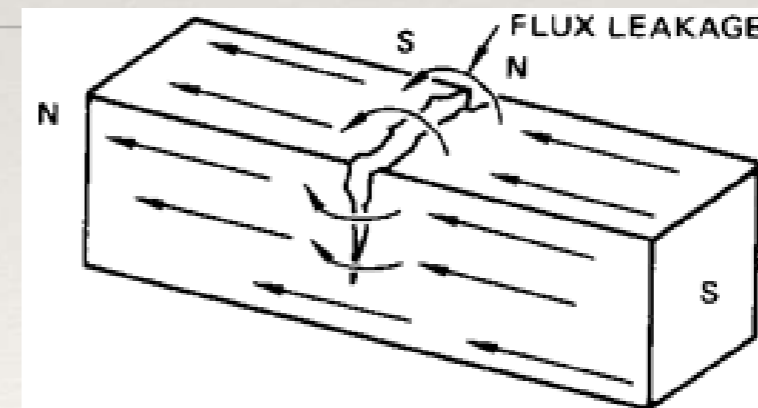
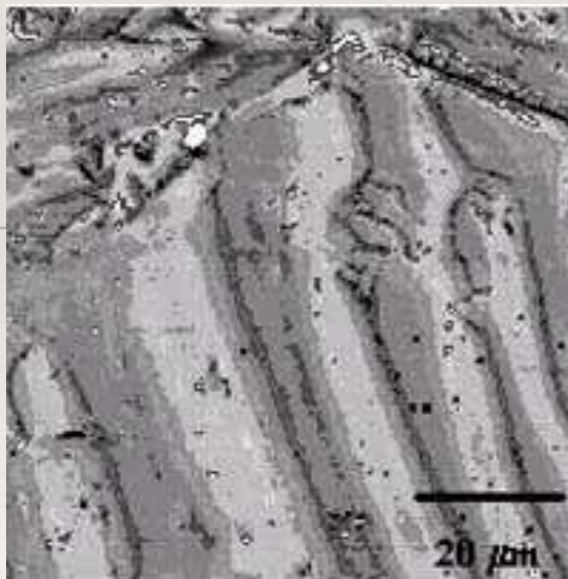
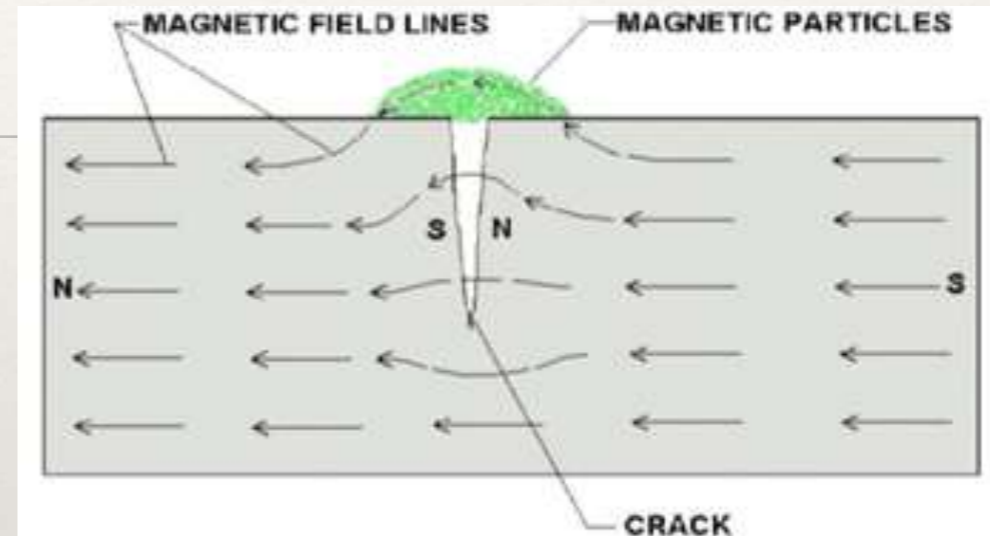
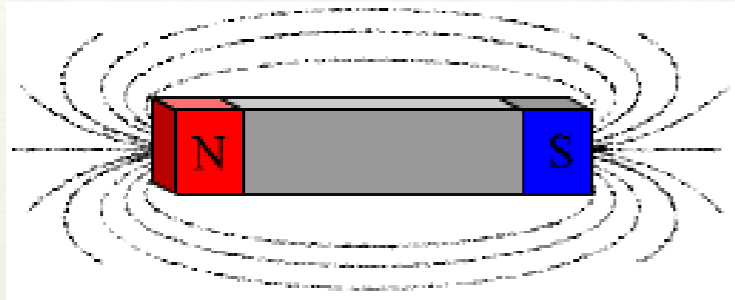
Bar Magnet

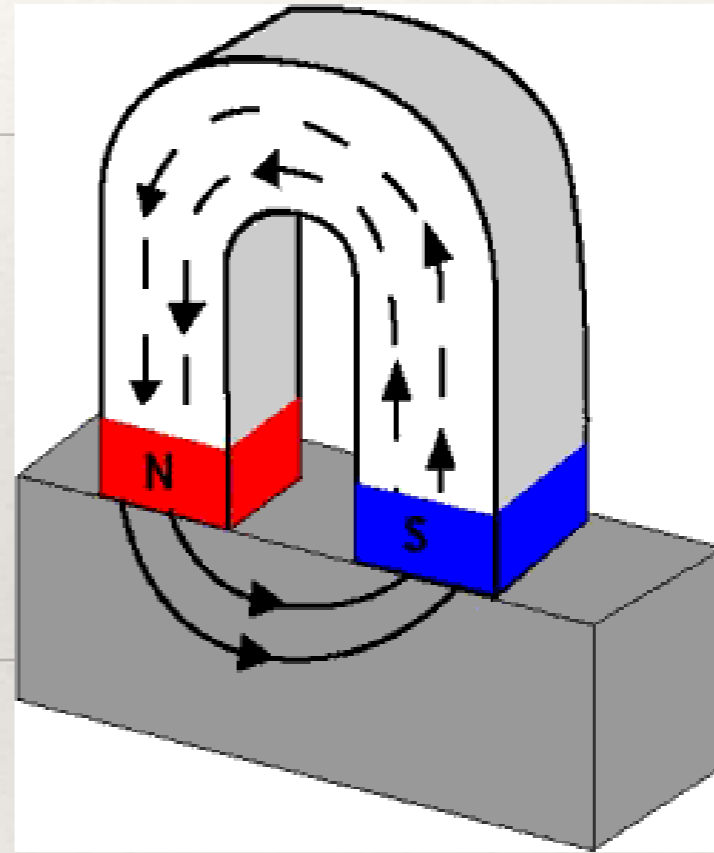
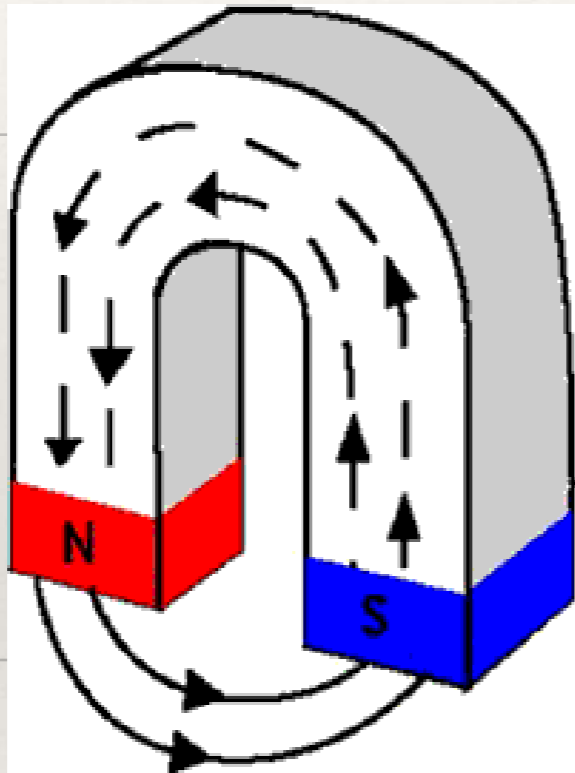


The Earth

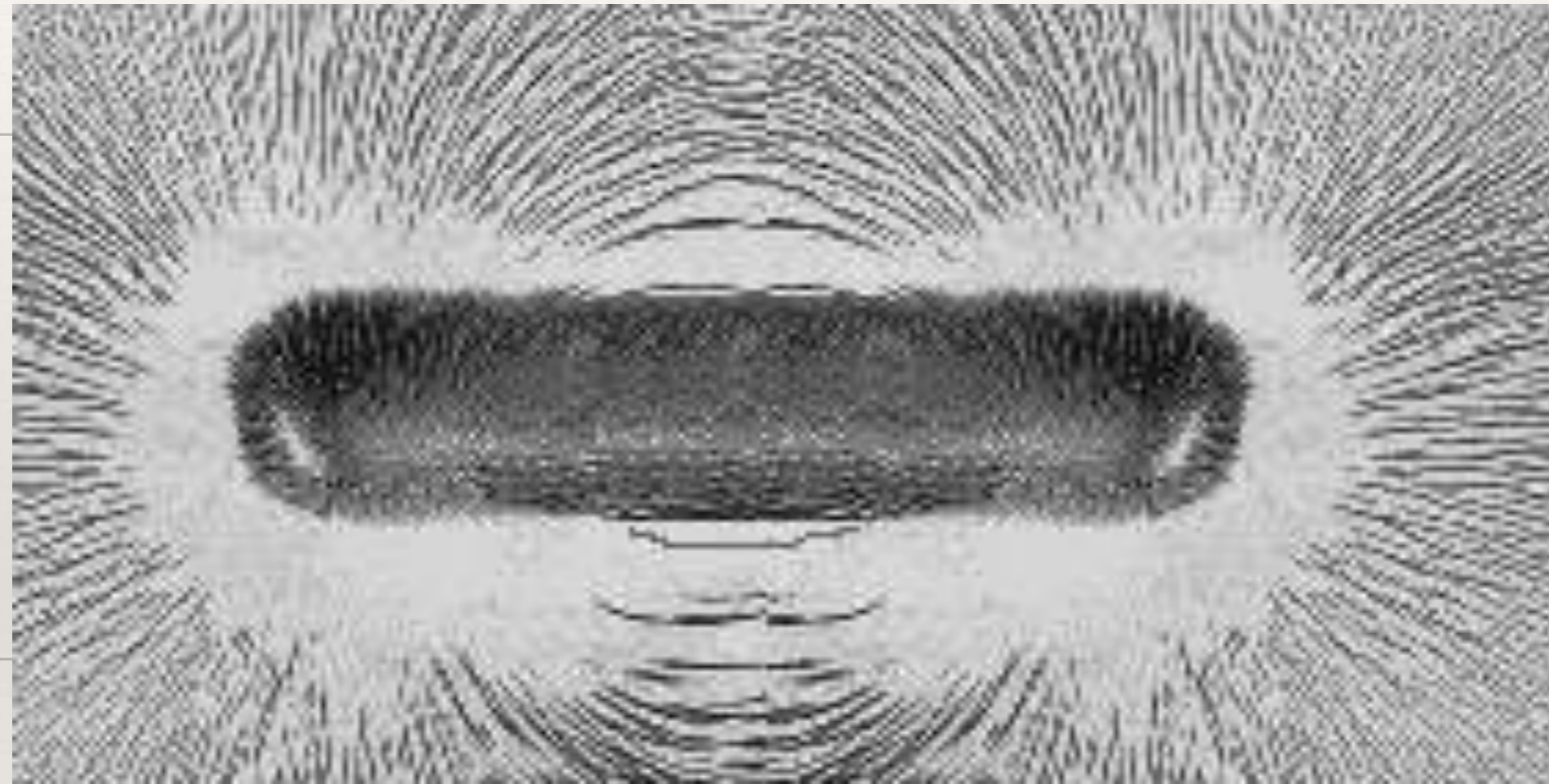
Magnetic Field Sources

Campo Magnético

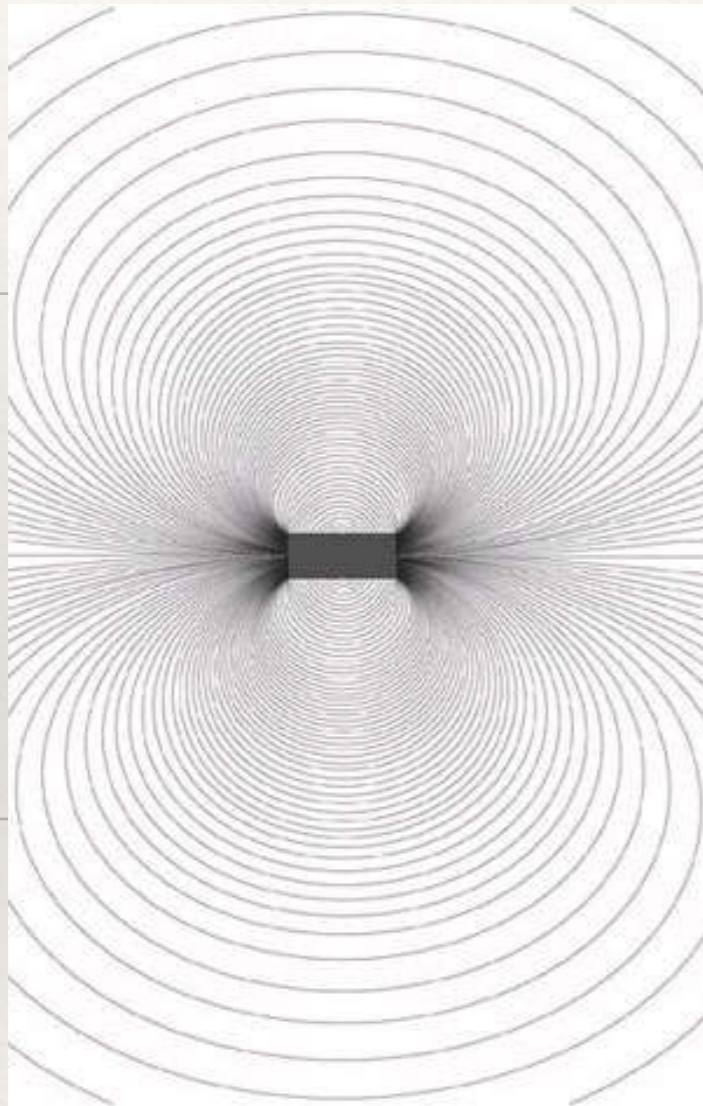




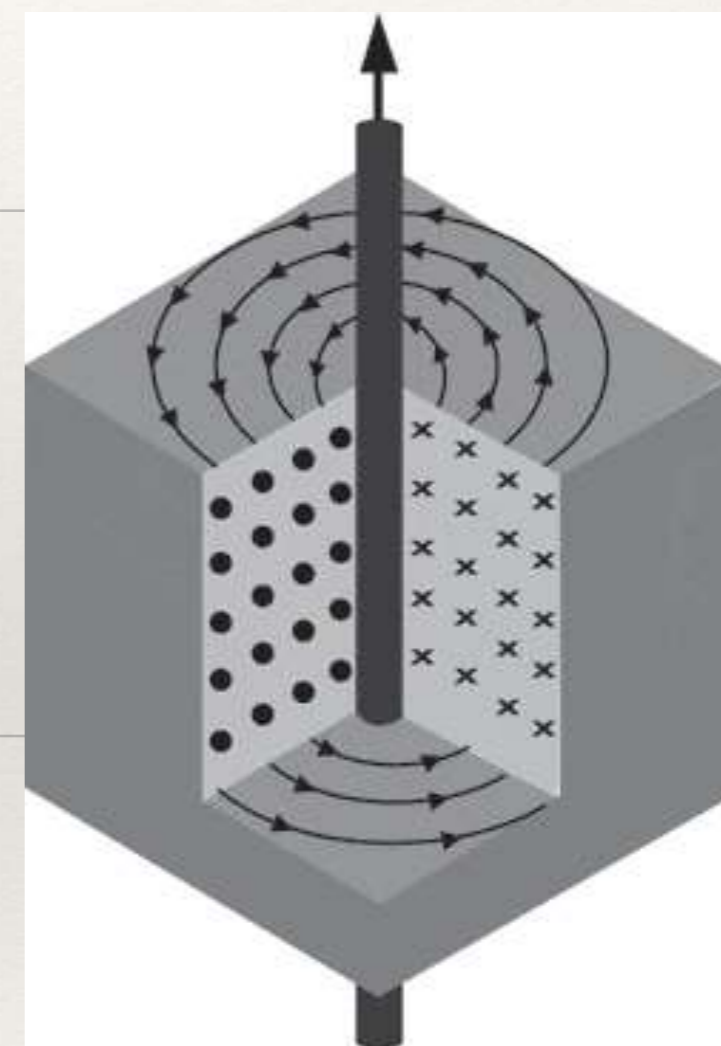
Líneas de Fuerza



Líneas de Fuerza



El campo magnético de un imán puede ser visualizado como un número de líneas que siguen una trayectoria cerrada.



Quantity

CGS unit

SI Unit

Magnetic field

$$H = 1 \text{ Oe}$$

$$H = 1000/4\pi \text{ A.m}^{-1}$$

Magnetic induction

$$B = 1 \text{ gauss}$$

$$B = 1 \times 10^{-4} \text{ Tesla}$$

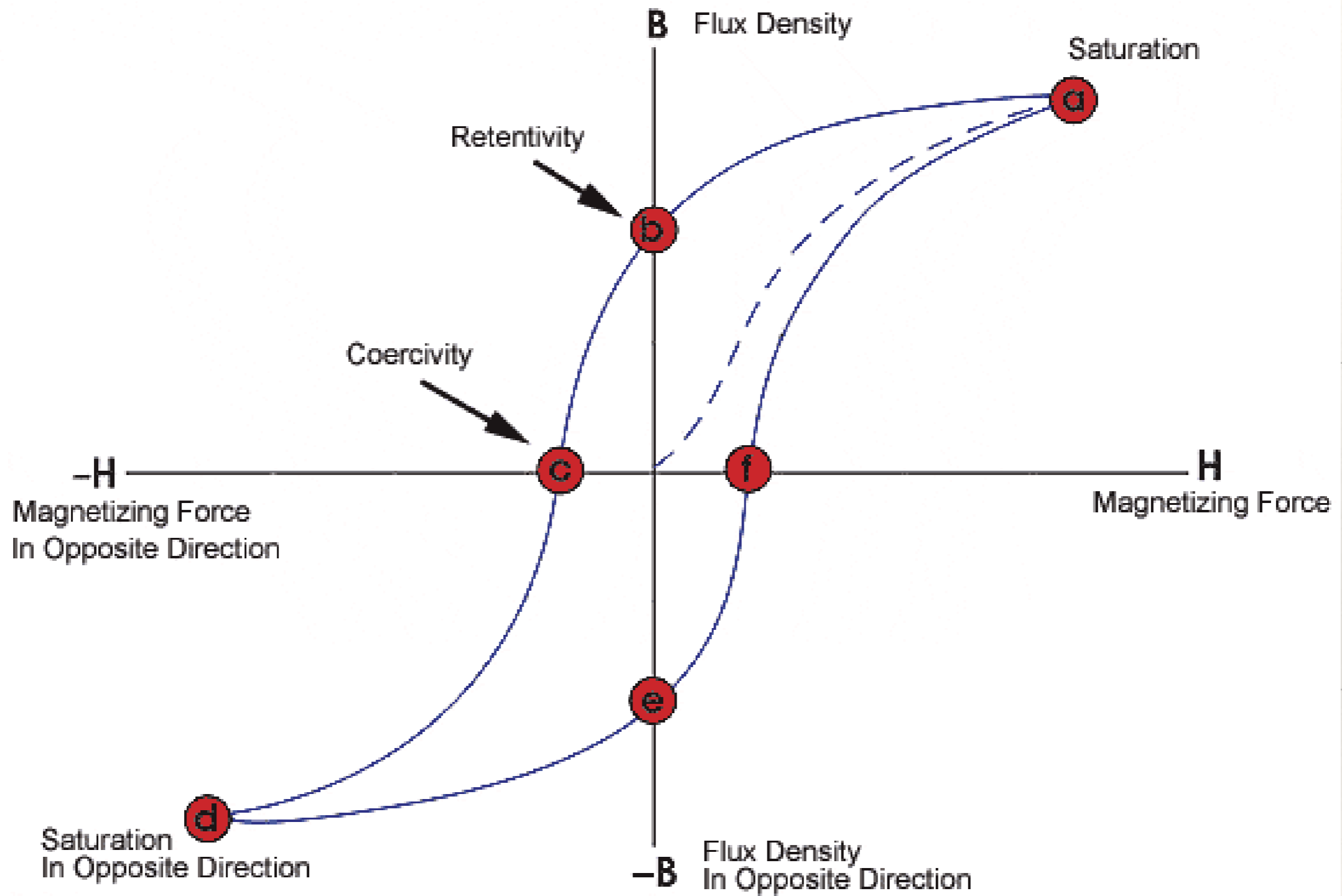
Magnetization

$$M = 1 \text{ erg.Oe}^{-1}.\text{cm}^{-3}$$

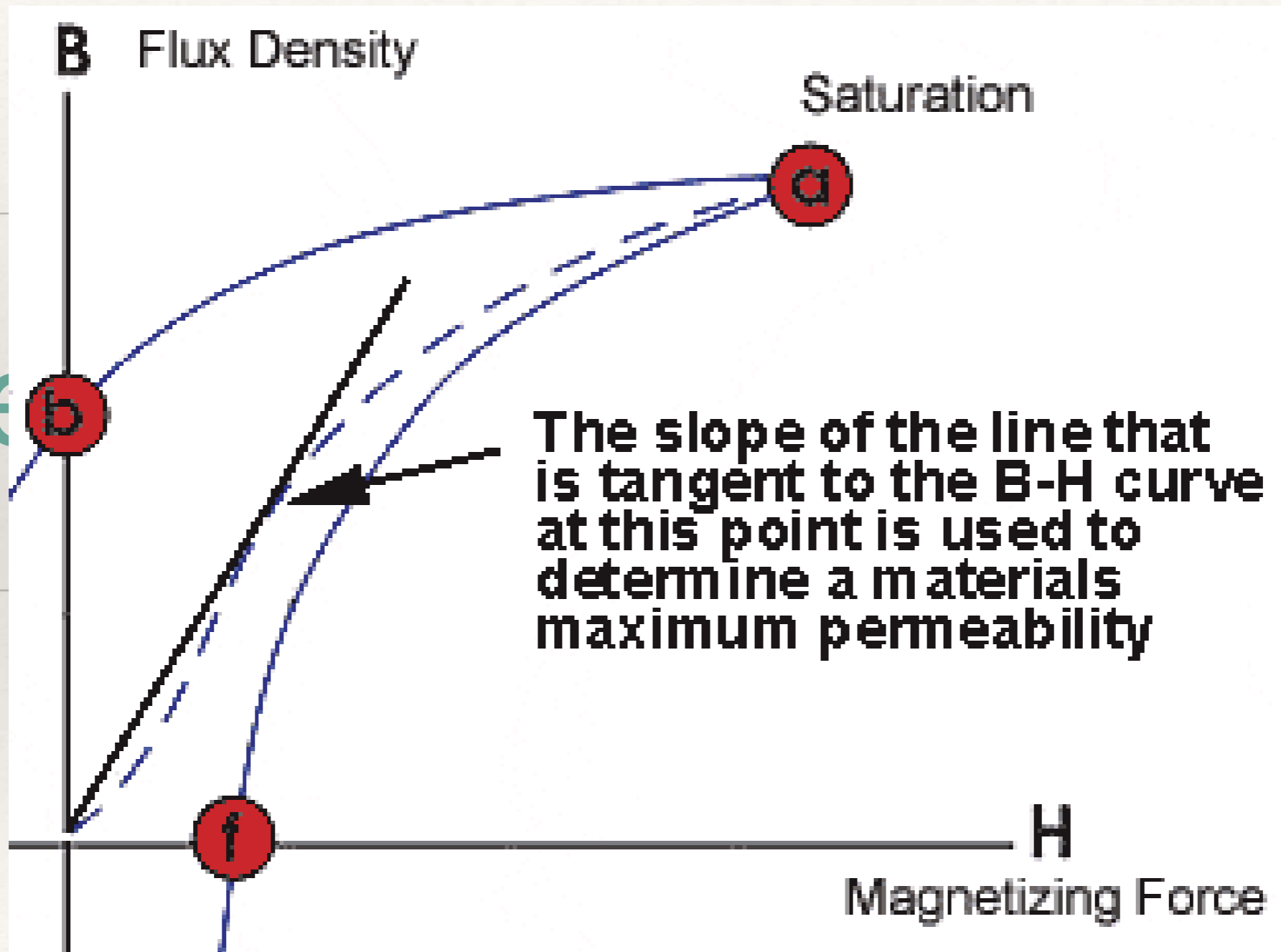
$$M = 1 \times 10^3 \text{ A.m}^{-1}$$

Fuerza Magnetizante

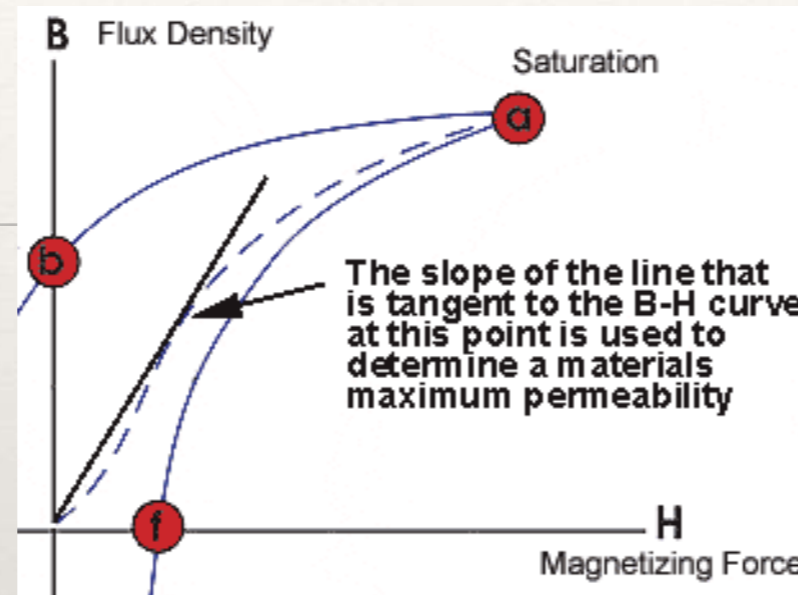
A mayor número de vueltas o mayor flujo de corriente, mayor fuerza magnetizante.



Pe



Permeabilidad



Permeabilidad relativa (μ_r):

$$\mu_r (\text{aire}) = 1$$

$$\mu_r (\text{Ferromagnéticos}) \gg \gg 1$$

$$\mu_r (\text{Paramagnéticos}) = \text{Ligeramente mayor que } 1 \text{ (Ejemplo: } 1.02)$$

$$\mu_r (\text{Diamagnéticos}) = \text{Ligeramente menor que } 1 \text{ (Ejemplo: } 0.98)$$

Permeabilidad Relativa

Cobre = 1

Aire = 1

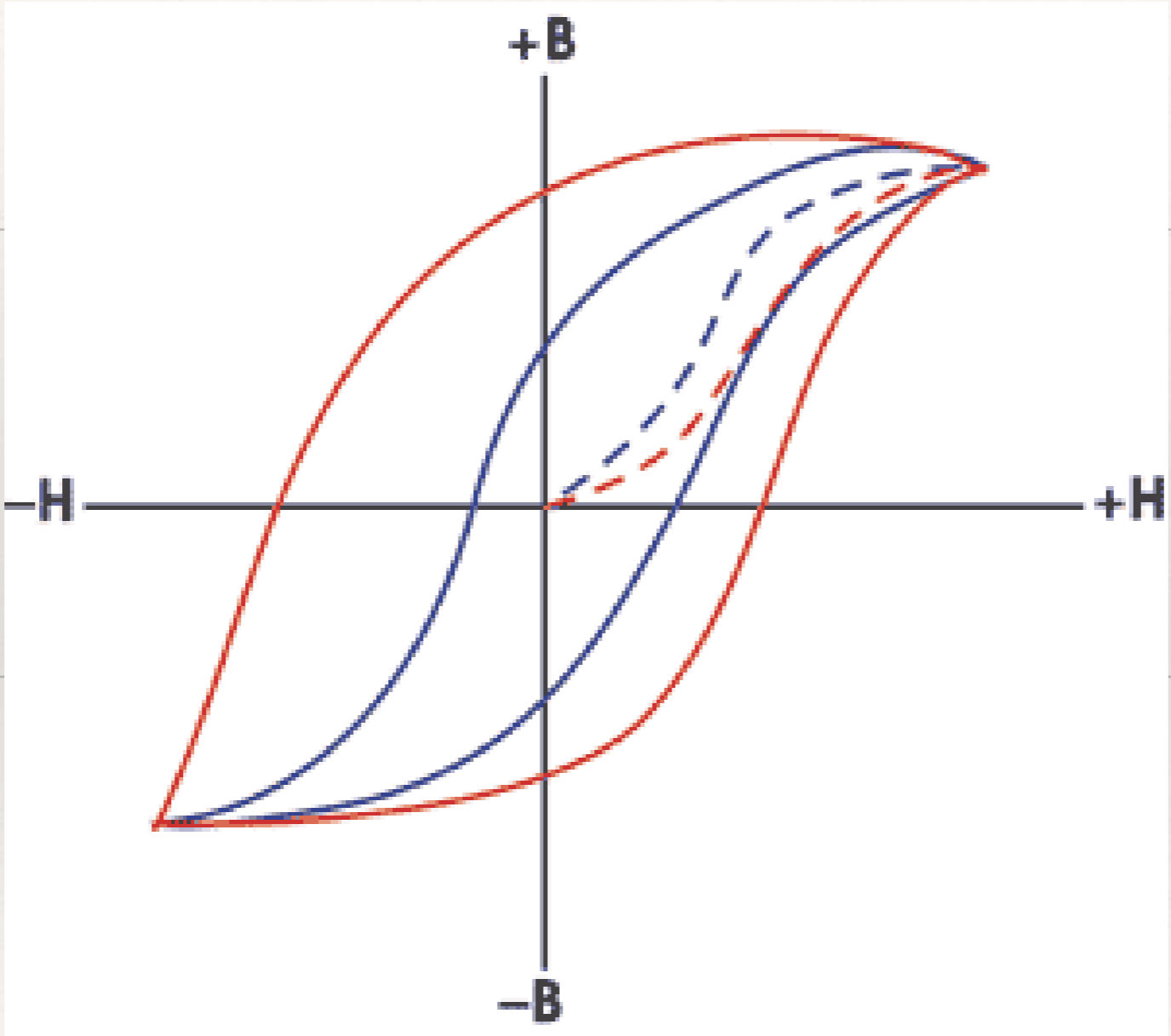
Aluminio = 1

Plásticos = 1

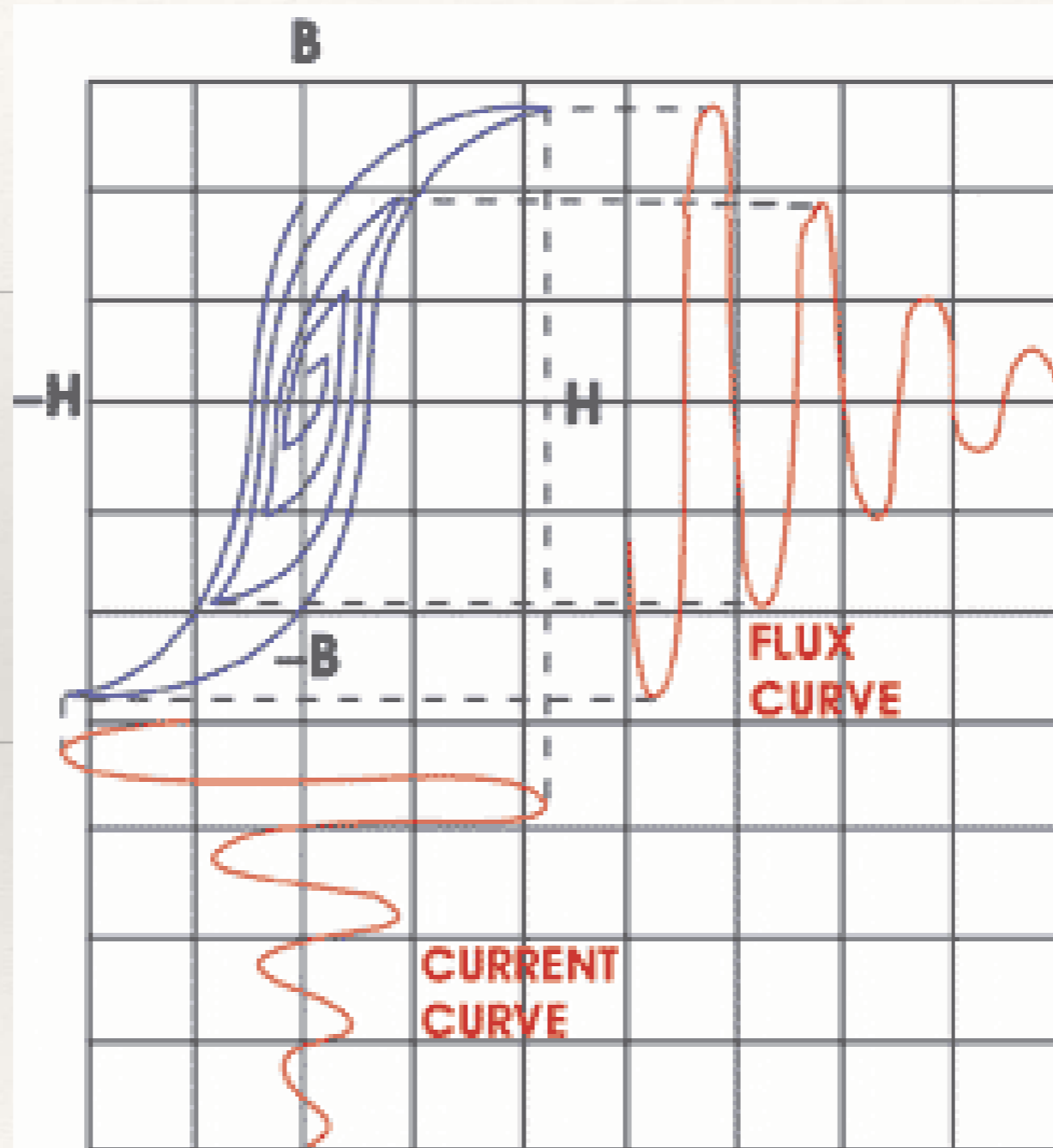
Acero Inoxidable Austenítico = 1.02

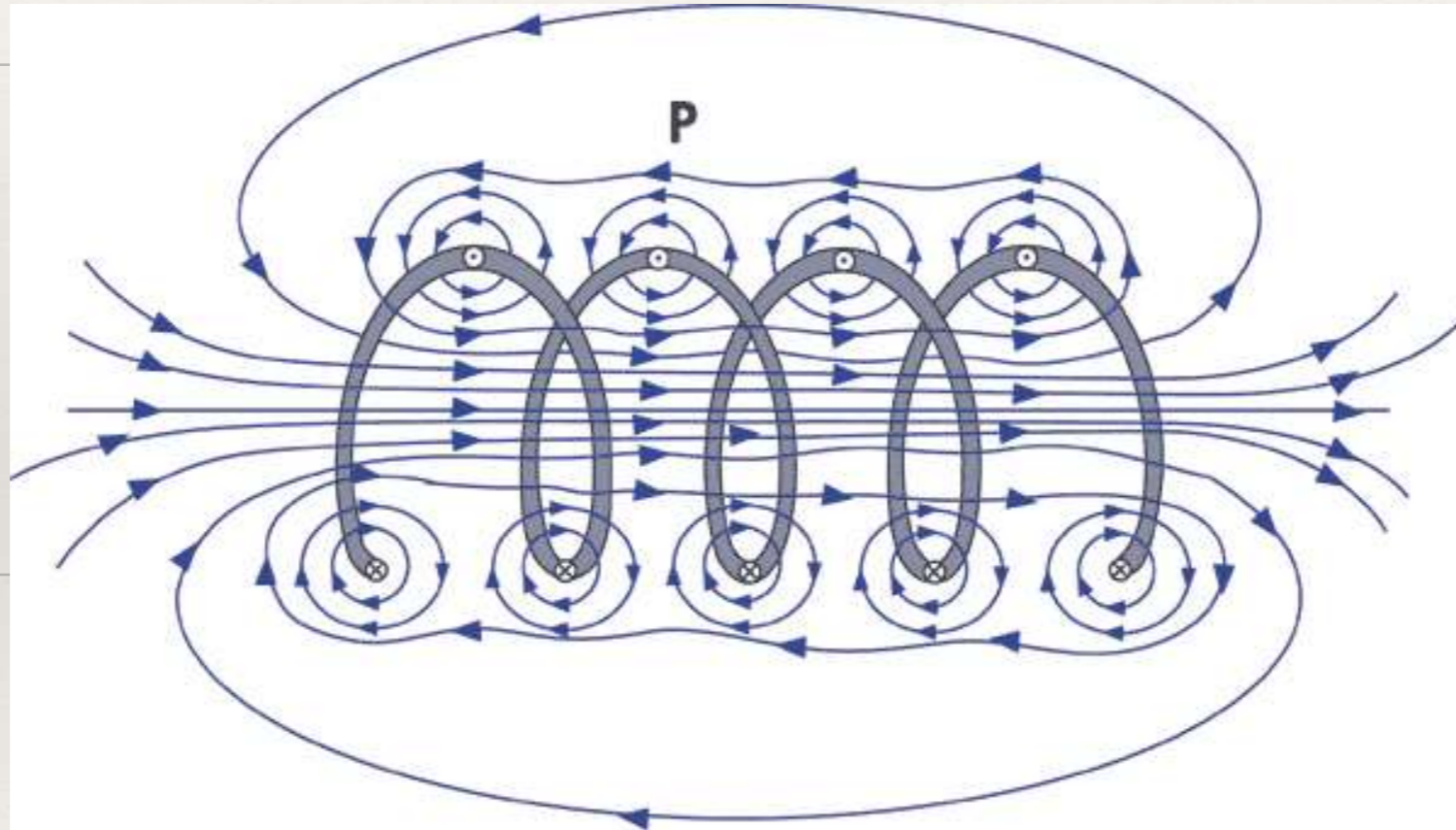
Acero Fundido = 175

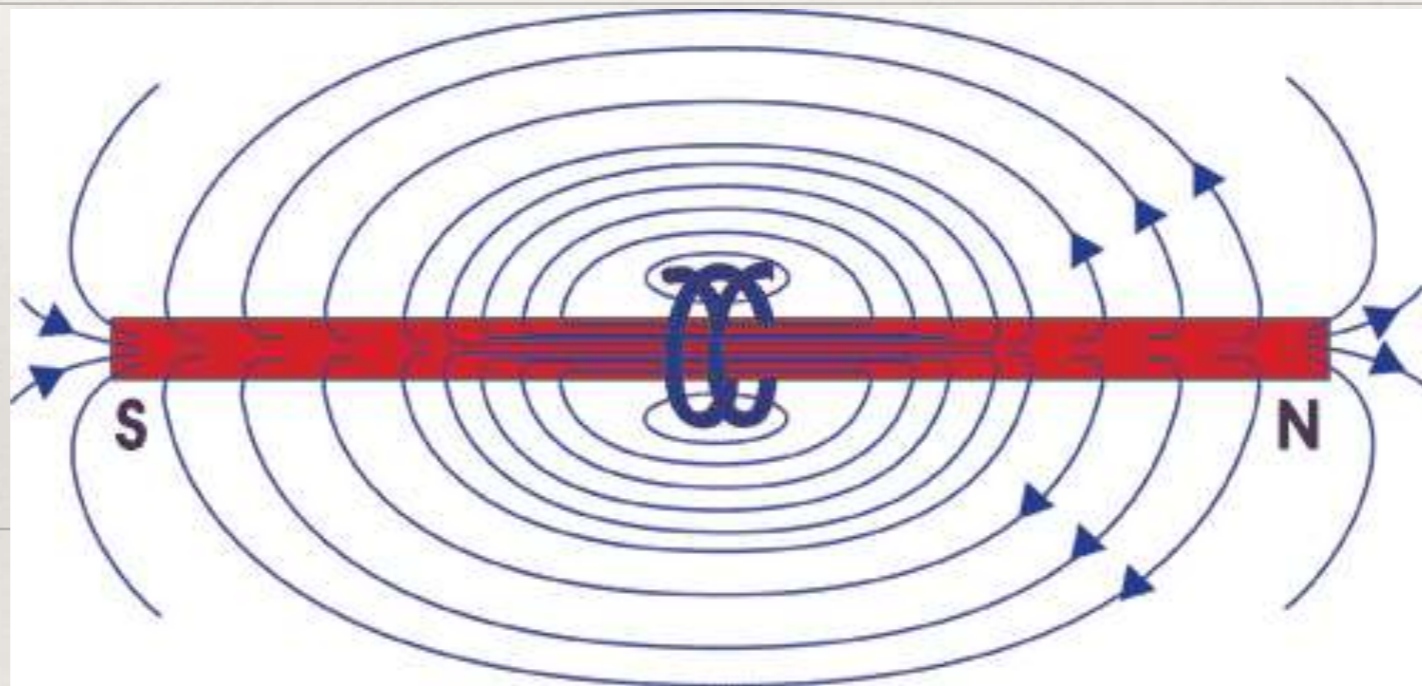
Acero Alta Aleación = 750



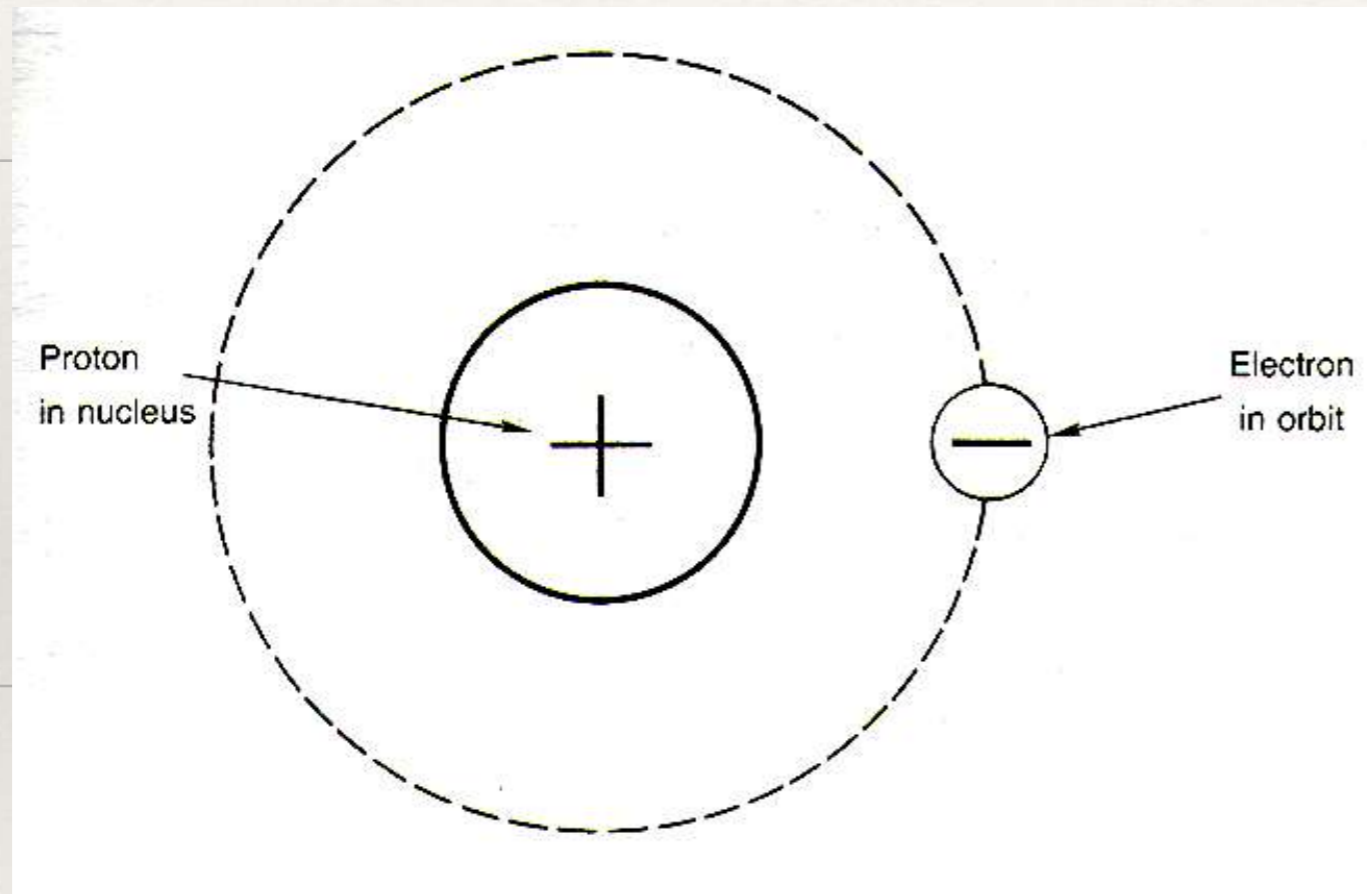
Demagnetizar



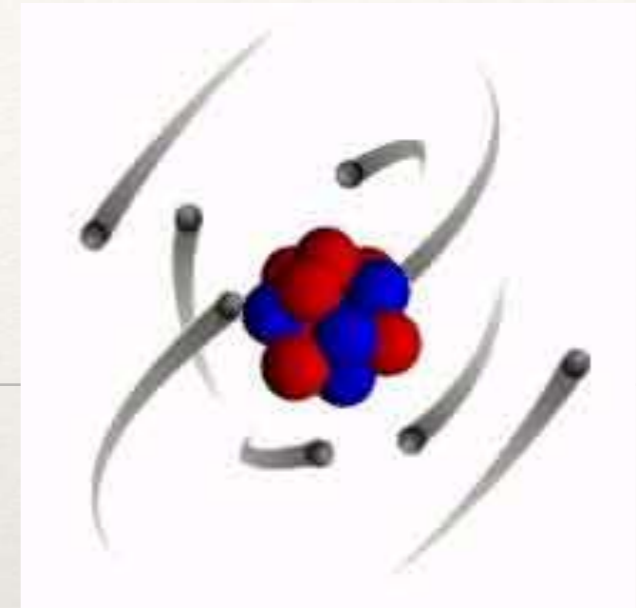




Electricidad

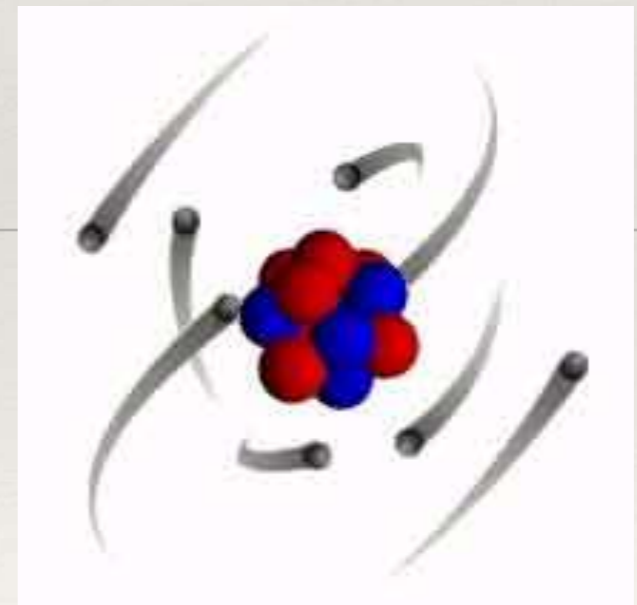


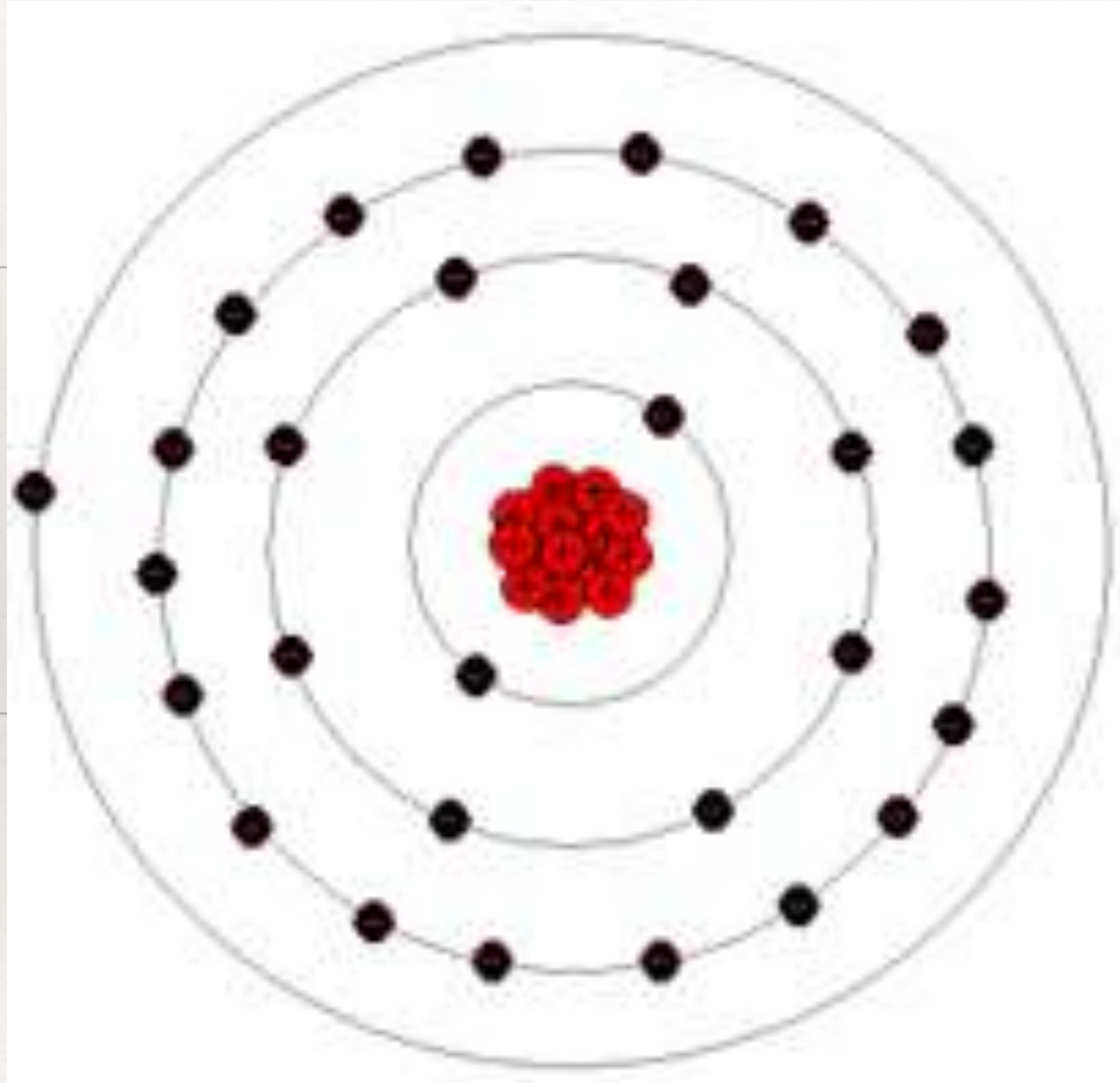
H



Materia

Toda la materia esta constituida por átomos.

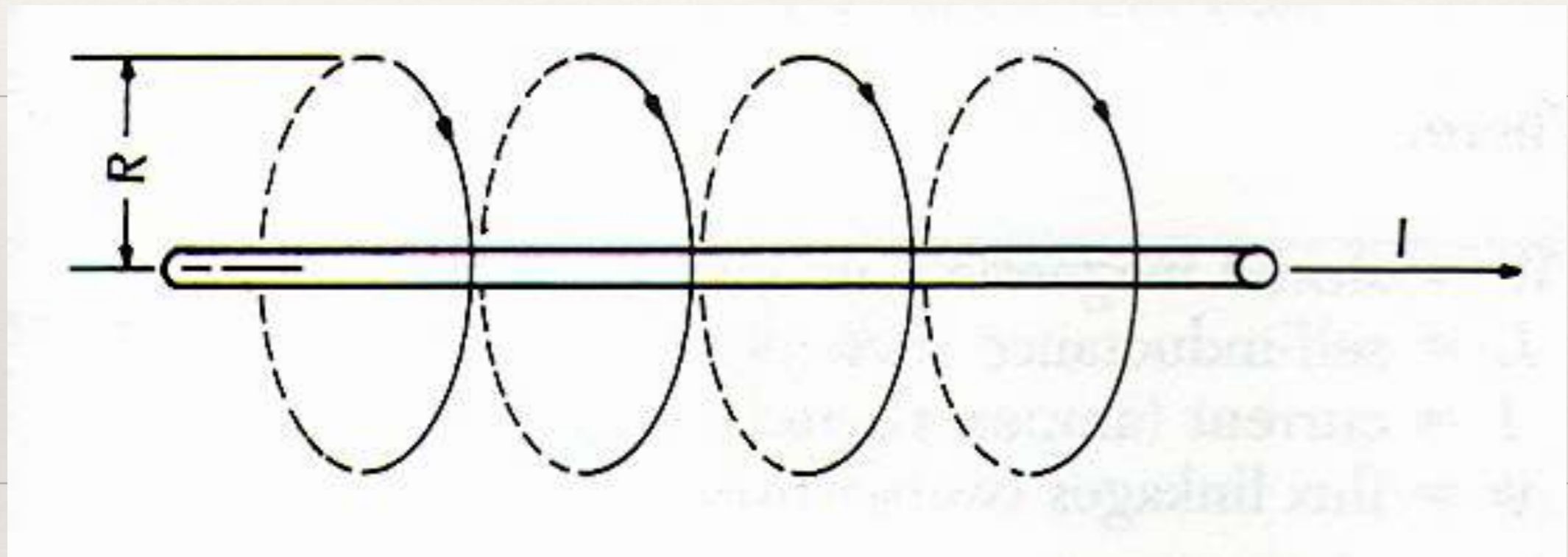




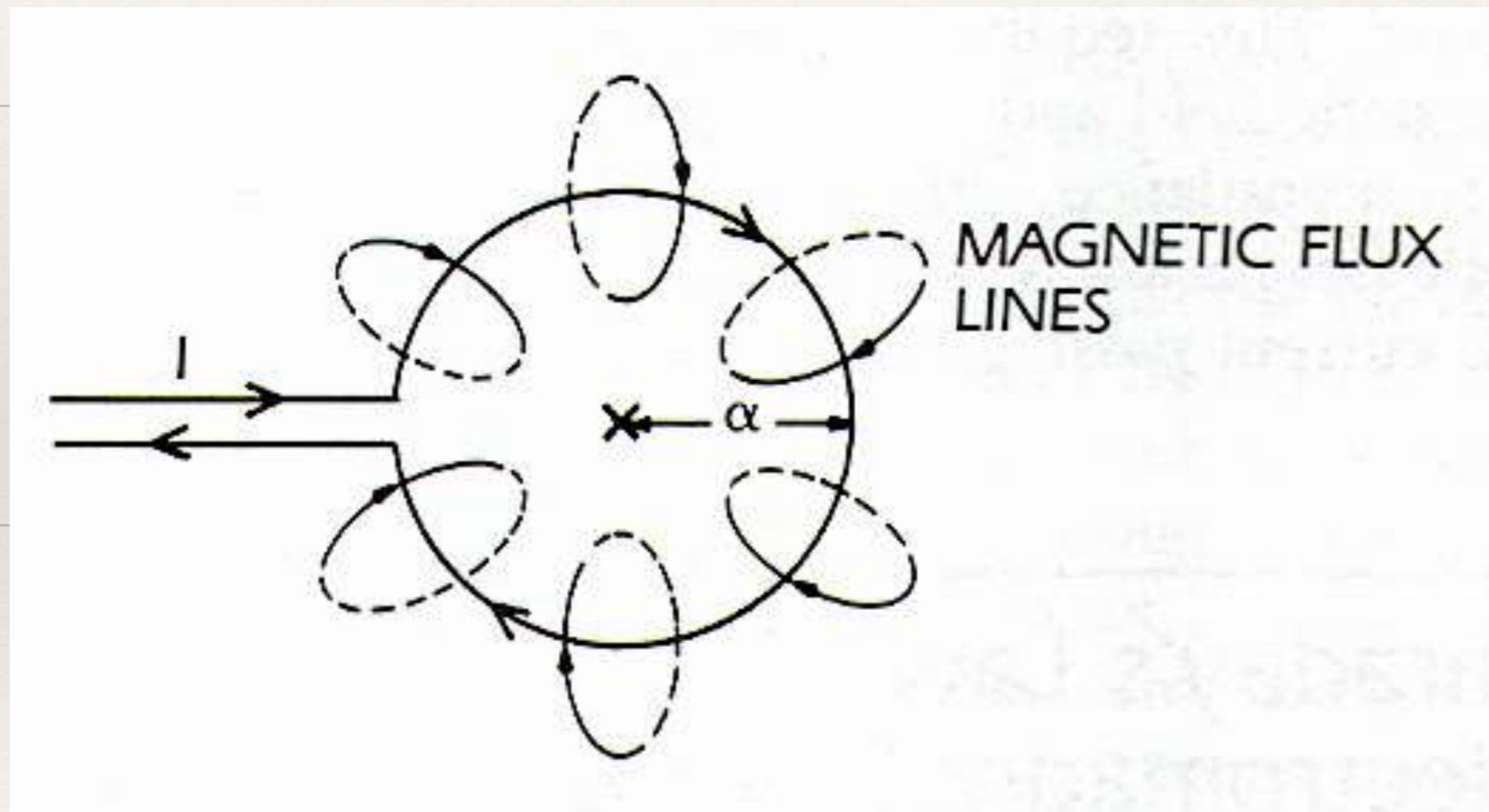
Cu



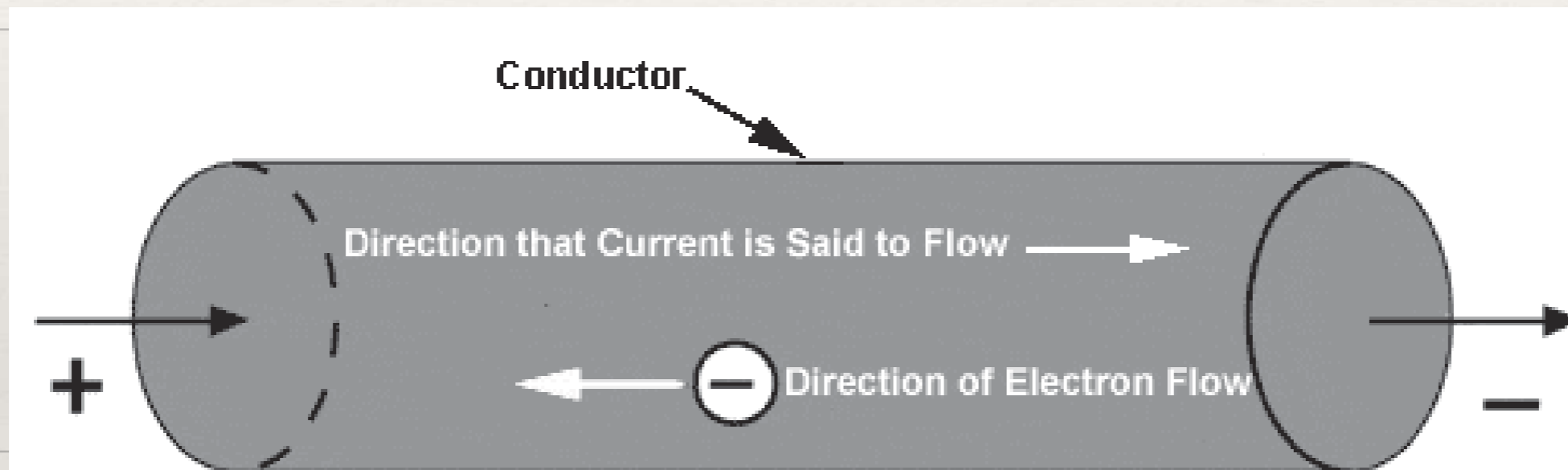
Campo Magnético



Campo Magnético



Convención



Michael Faraday (1791-1867) (Inducción Electromagnética)

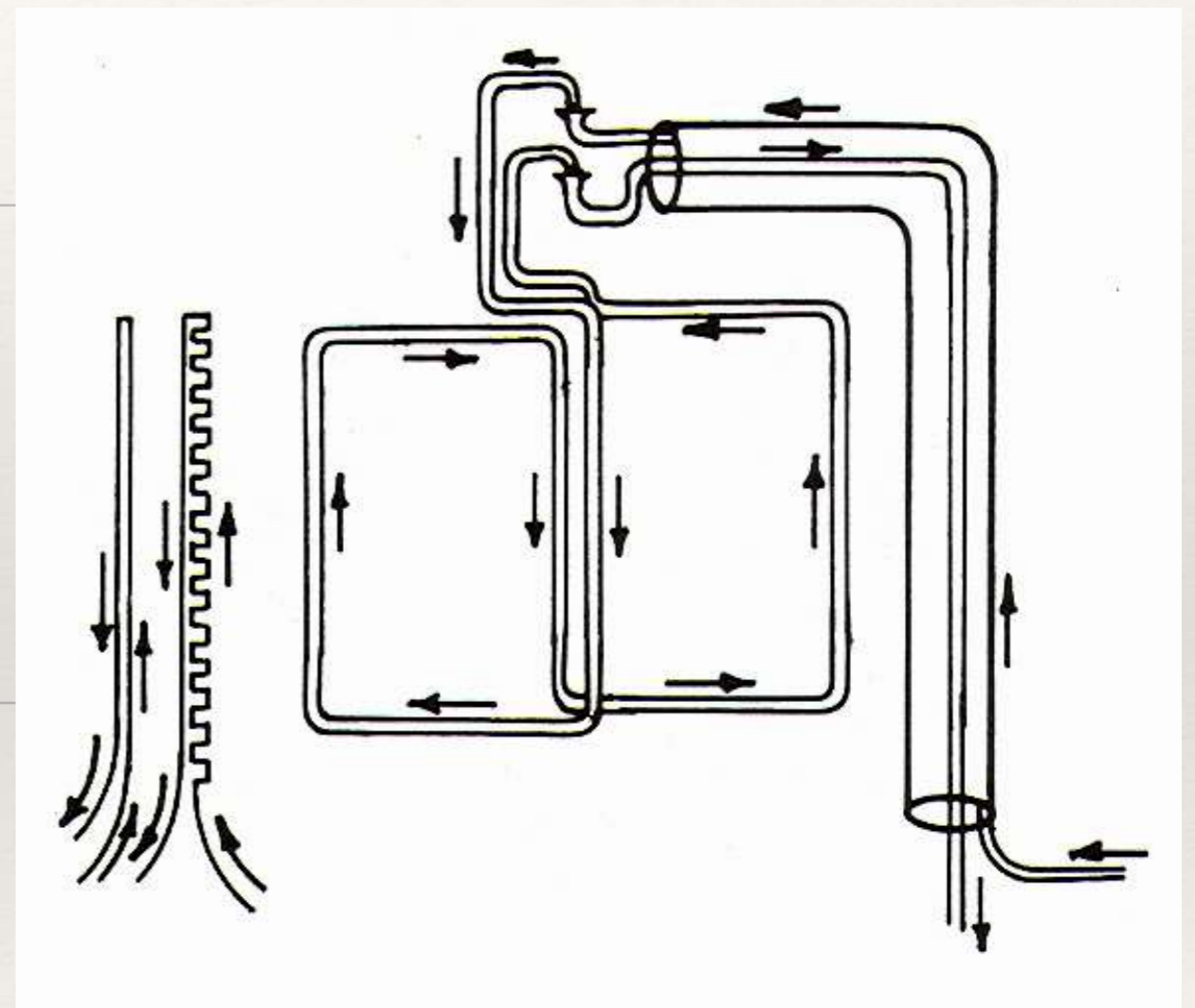
En 1831 descubrió la
inducción
electromagnética.



Inducción Electromagnética

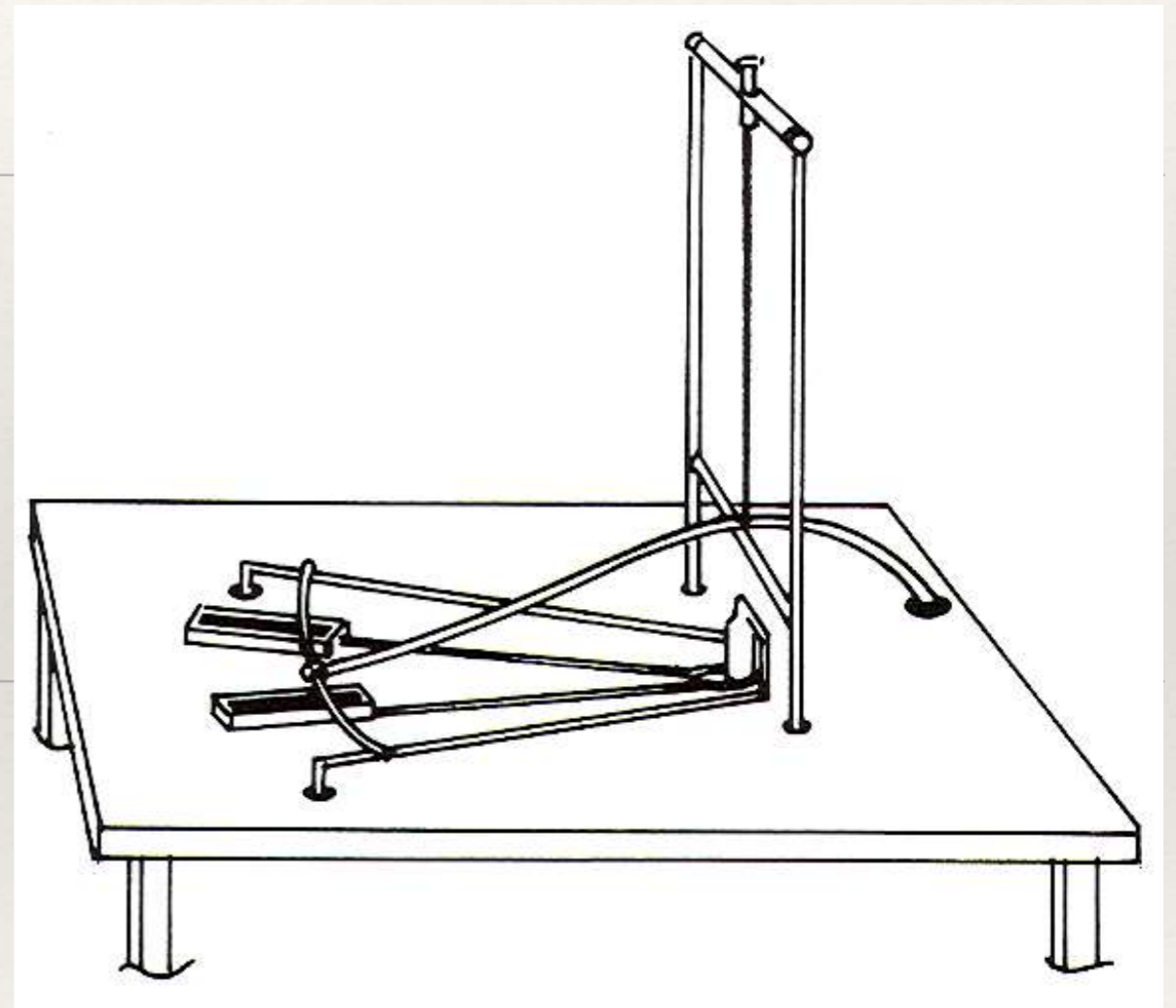
El movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor causa que se desarrolle un voltaje en ese conductor.

Principio fundamental de el método de ET.

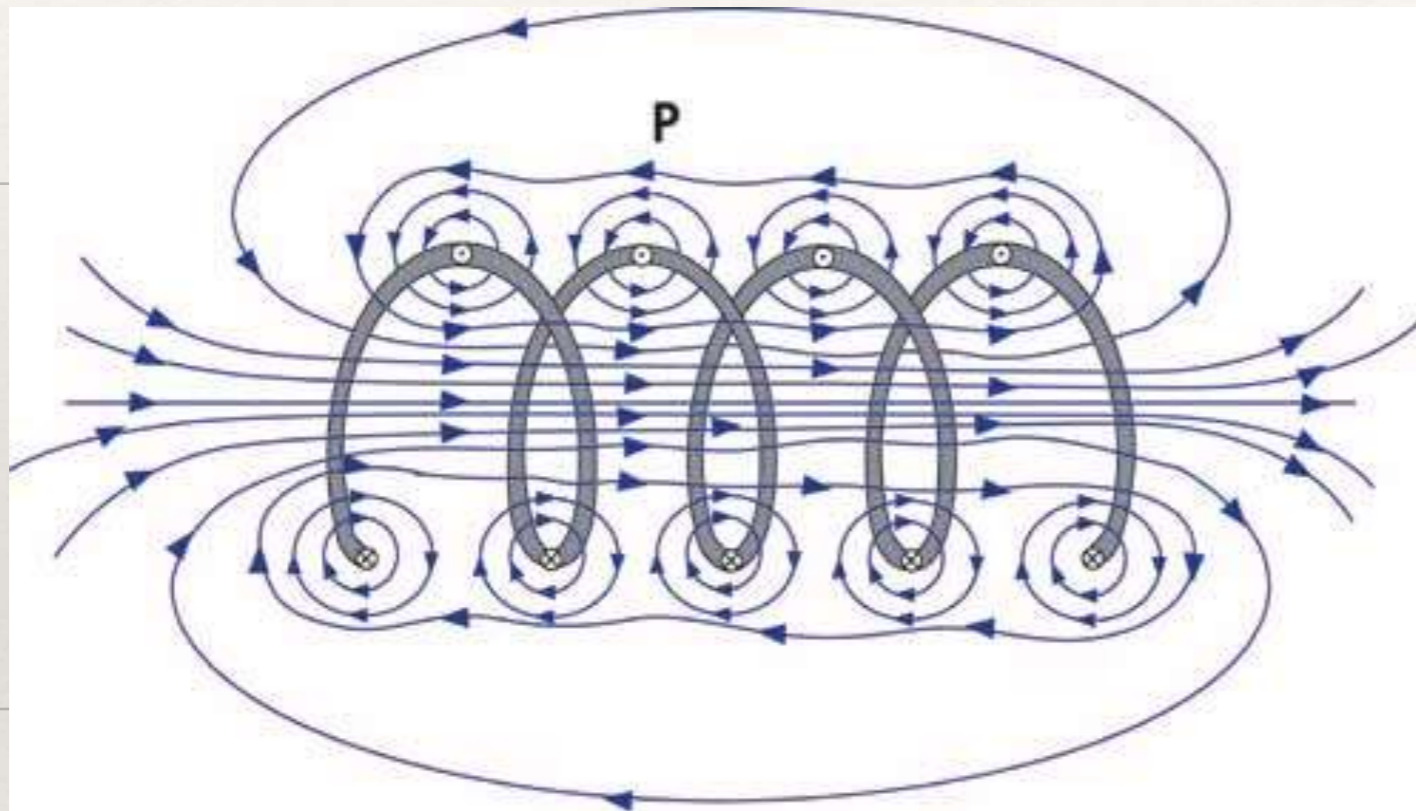


Inducción Electromagnética

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$



Inducción Electromagnética



$$V_L = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

Georg Simon Ohm (1789-1854)



Resistencia

El paso de una corriente eléctrica a través de una sustancia es impedido por la fricción y por las fuerzas de atracción que muestran algunos átomos y moléculas hacia los electrones.

Resistividad y Resistencia

$$R = r * L / S$$

Donde:

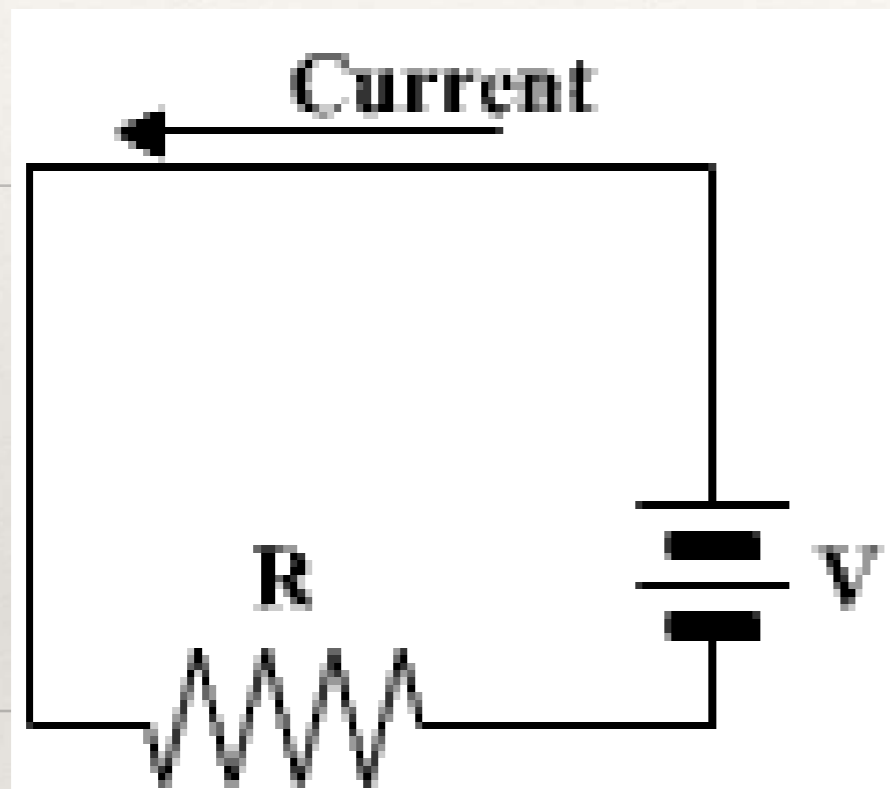
r = resistividad

R = Resistencia (Ohm)

L = Longitud

S = Area transversal

Ley de Ohm



$$I = V / R$$

Donde:

I = Corriente (Amperios)

V = Voltaje (Voltios)

R = Resistencia (Ohm)

International Annealed Copper Standard (IACS)

— Escala de conductividad usada en el método de Corrientes de Eddy.

— La base de la escala (100%) es el cobre puro, no aleado y normalizado. (Actualmente se ha logrado cobre más puro)

— Los otros materiales tienen una conductividad en porcentaje relativa a la del cobre.

Conductividad



Conductores Metálicos

Plata

Cobre

Oro

Aluminio

Tungsteno

Zinc

Níquel

Plomo

Semiconductores

Carbón

Silicio

Germanio

Selenio

Aisladores

Helio

Neón

Argón

Plásticos

Cerámicas

Dieléctrico

Un aislador que puede mantener una carga eléctrica

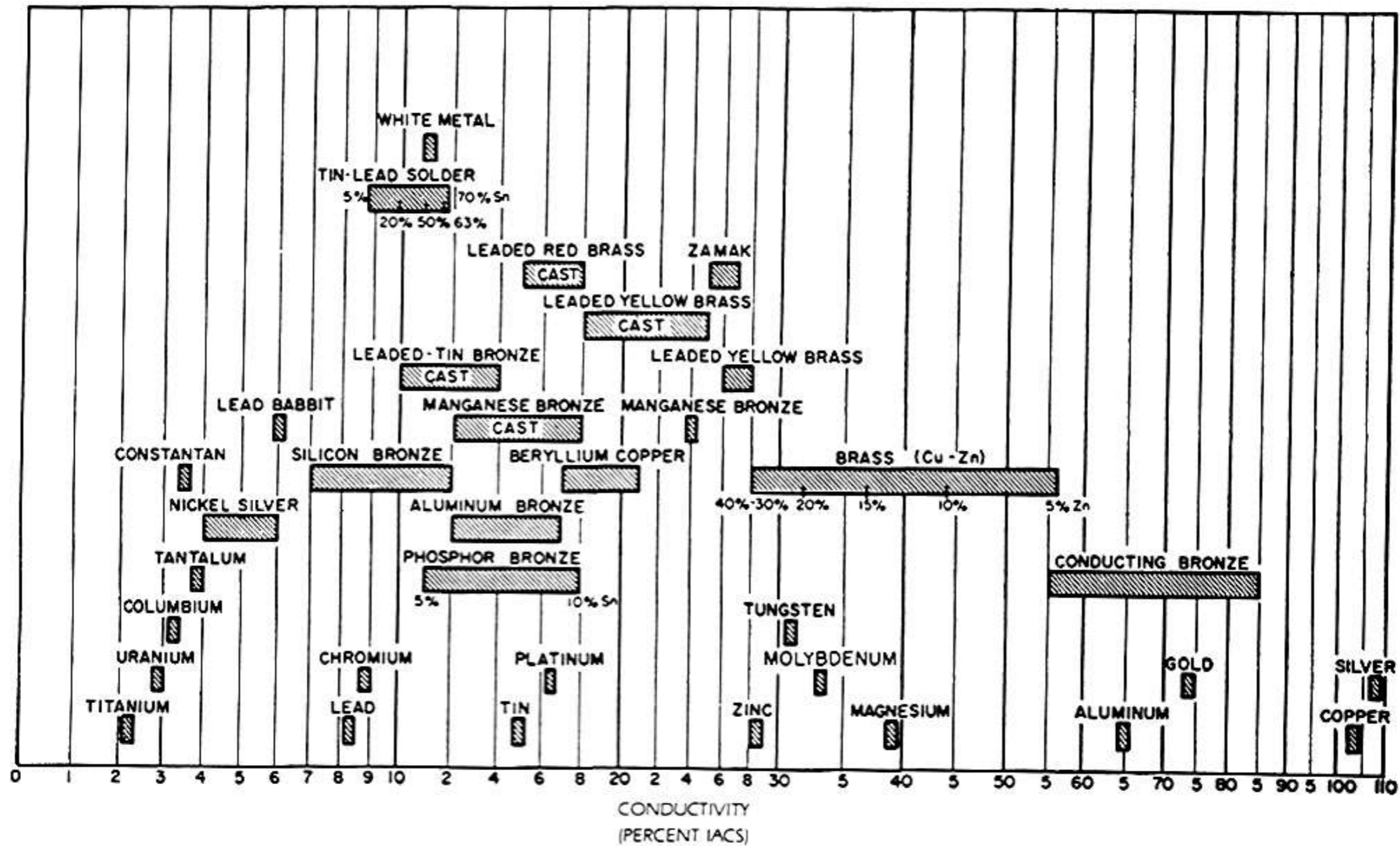
Vidrio +

Plástico -

Papel +

Resinoso (-)

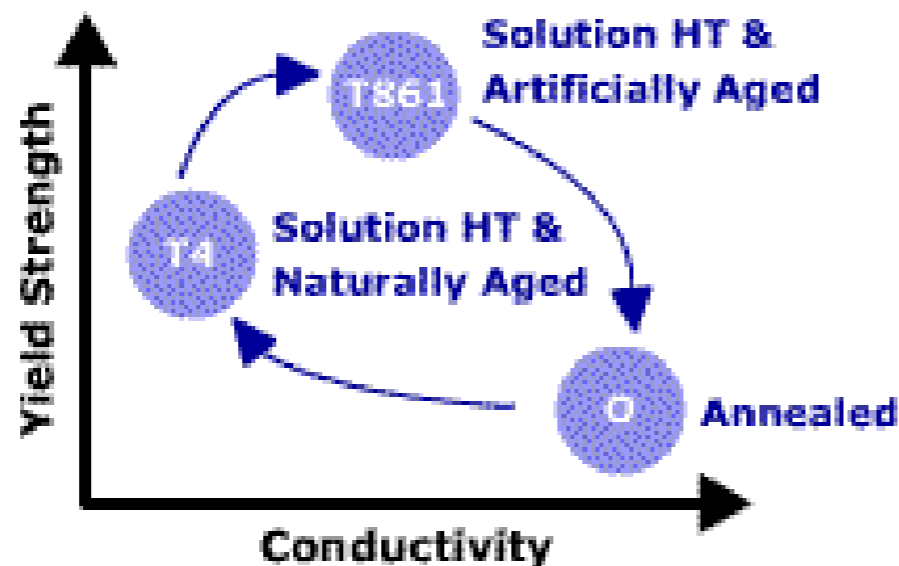
Vítreo (+)



Electrical conductivity is affected by:

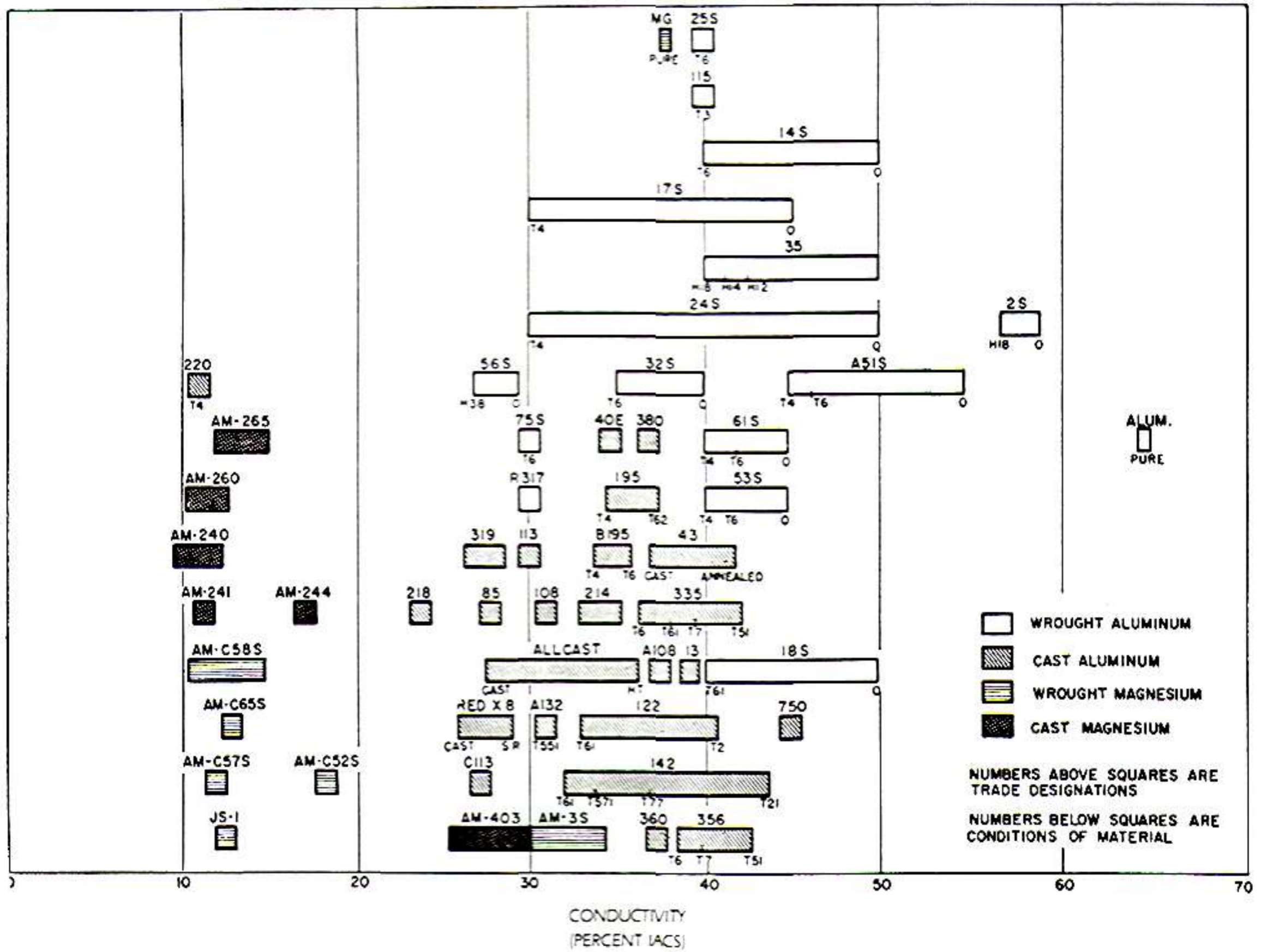
- Material Composition (atomic structure and alloying)
- Cold Working (dislocation restrict electron flow)
- Heat Treatment (annealing remove dislocations;
solution HT changes the atomic structure)

Heat Treatment of 2024 Aluminum



Solution HT freezes copper alloying atoms in the lattice structure of the aluminium. This distorts and stresses the structure making electron travel more difficult.

Aging and annealing allow the copper atoms to precipitate out of the structure which results in an increase in conductivity.

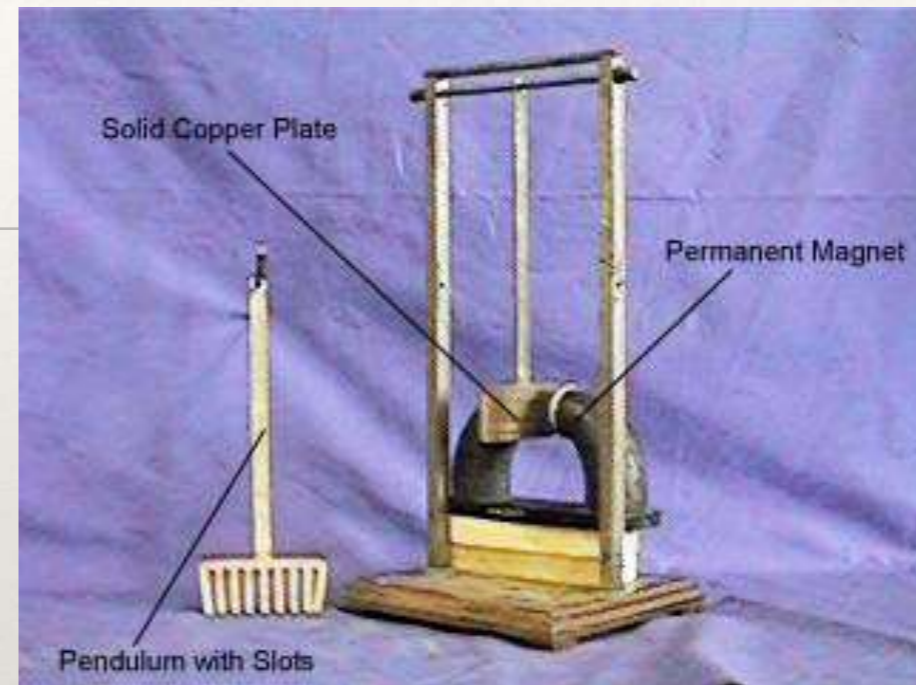


Corrientes de Eddy (Parásitas)

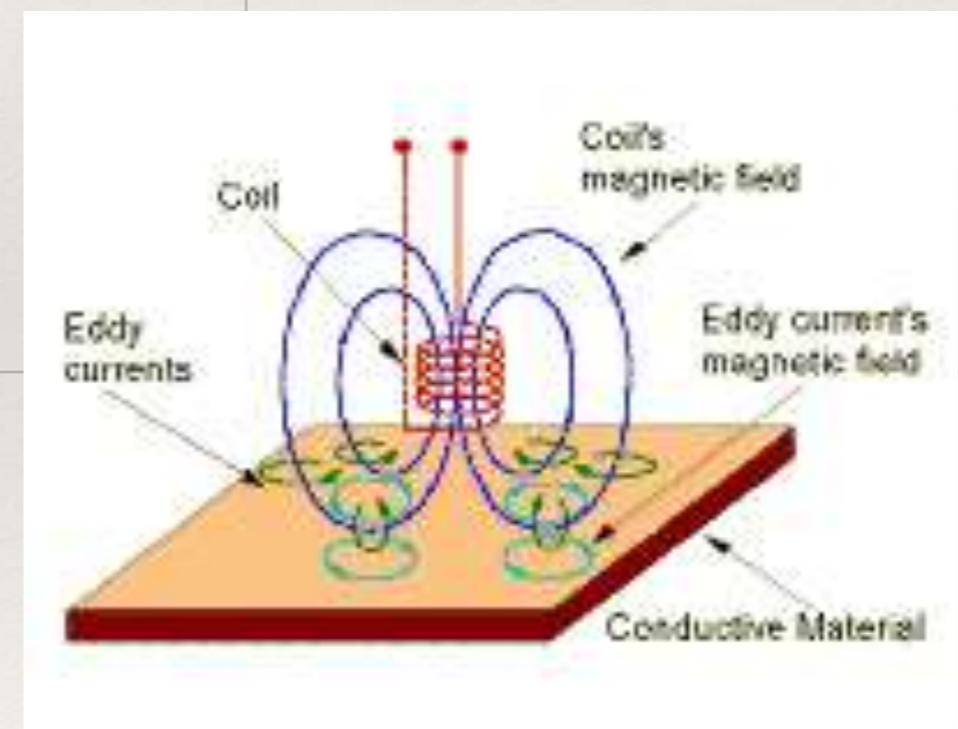
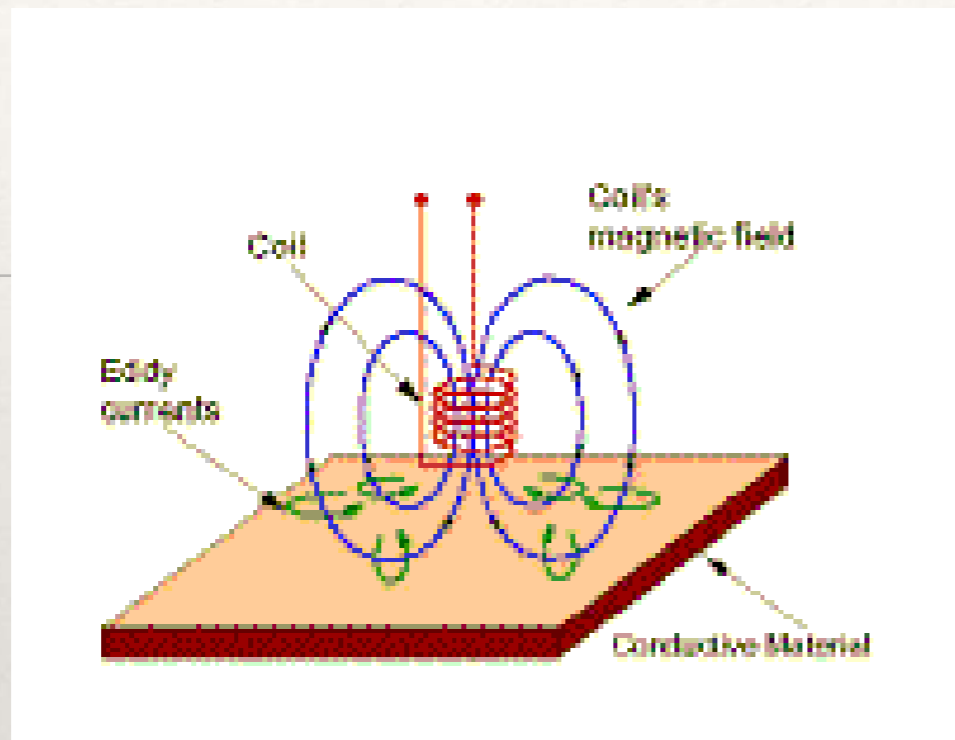
Son corrientes eléctricas que circulan en un material conductor debido a un campo magnético alternante.

Identificado por James Maxwell en 1864

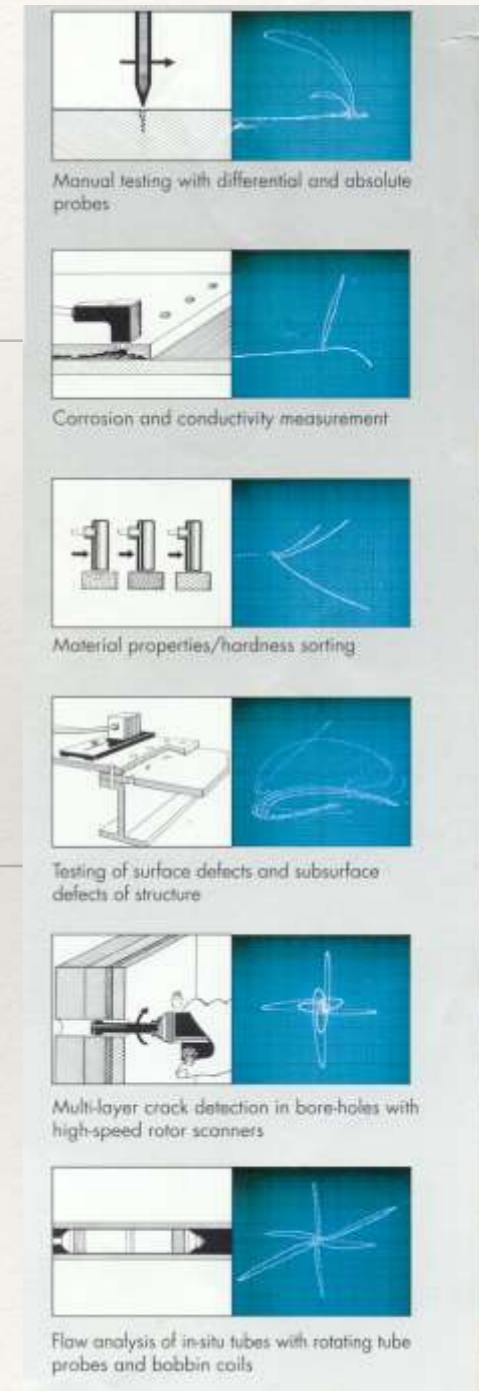
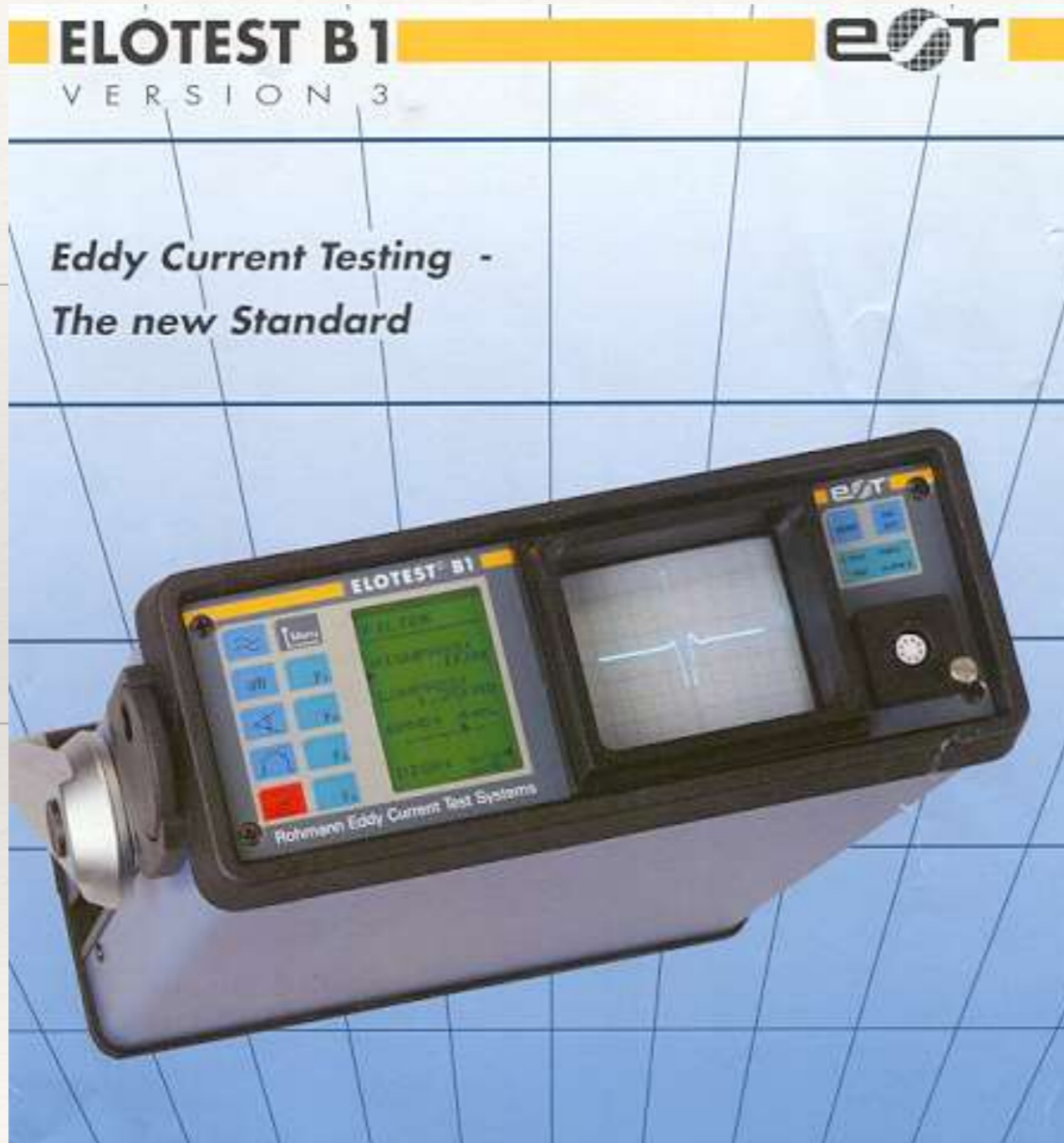
Péndulo de Corrientes de Eddy



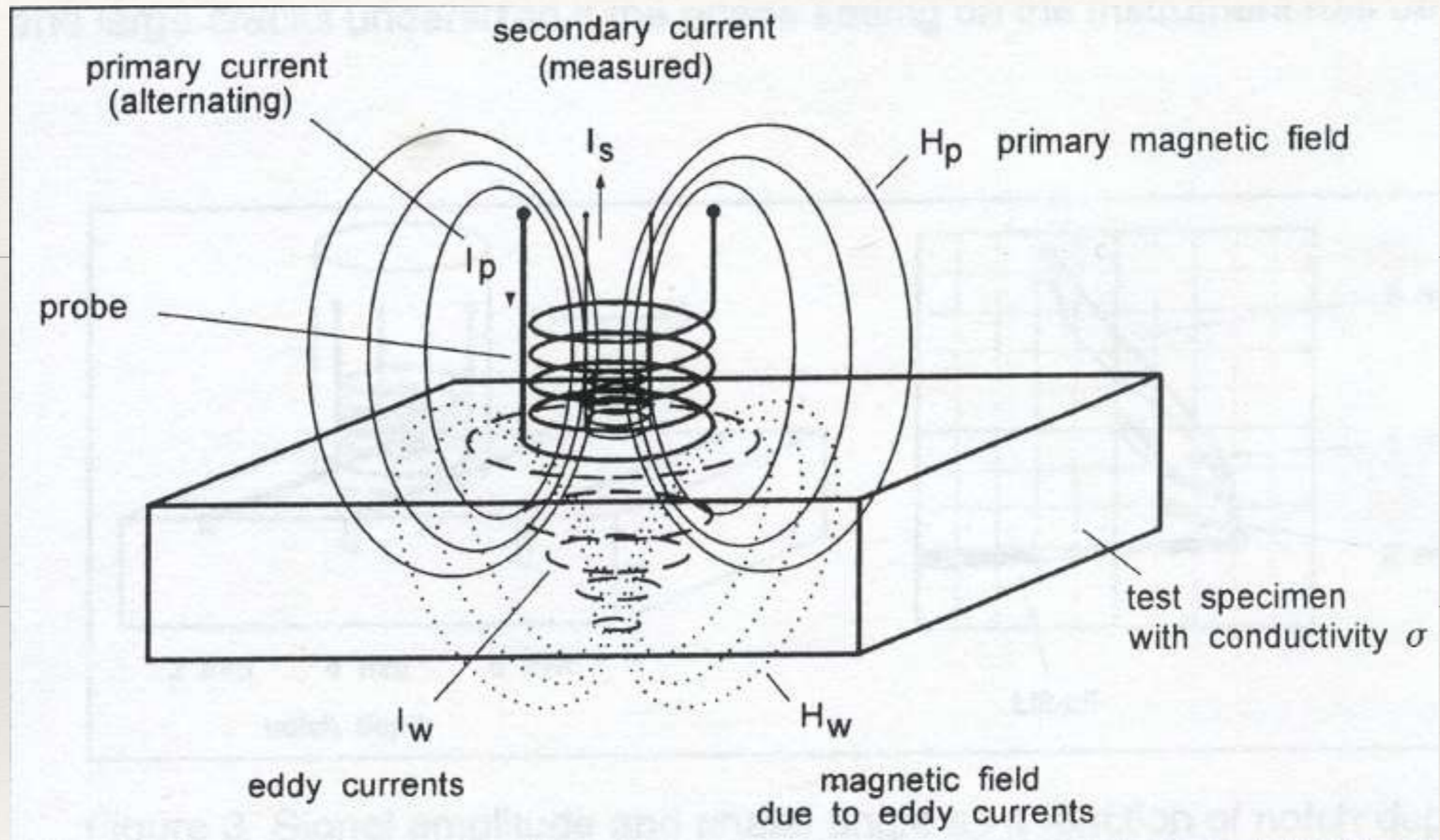
A solid copper plate swings between the poles of a permanent magnet, demonstrating magnetic damping. A second pendulum with a number of slots cut into it to reduce the eddy currents is provided for comparison



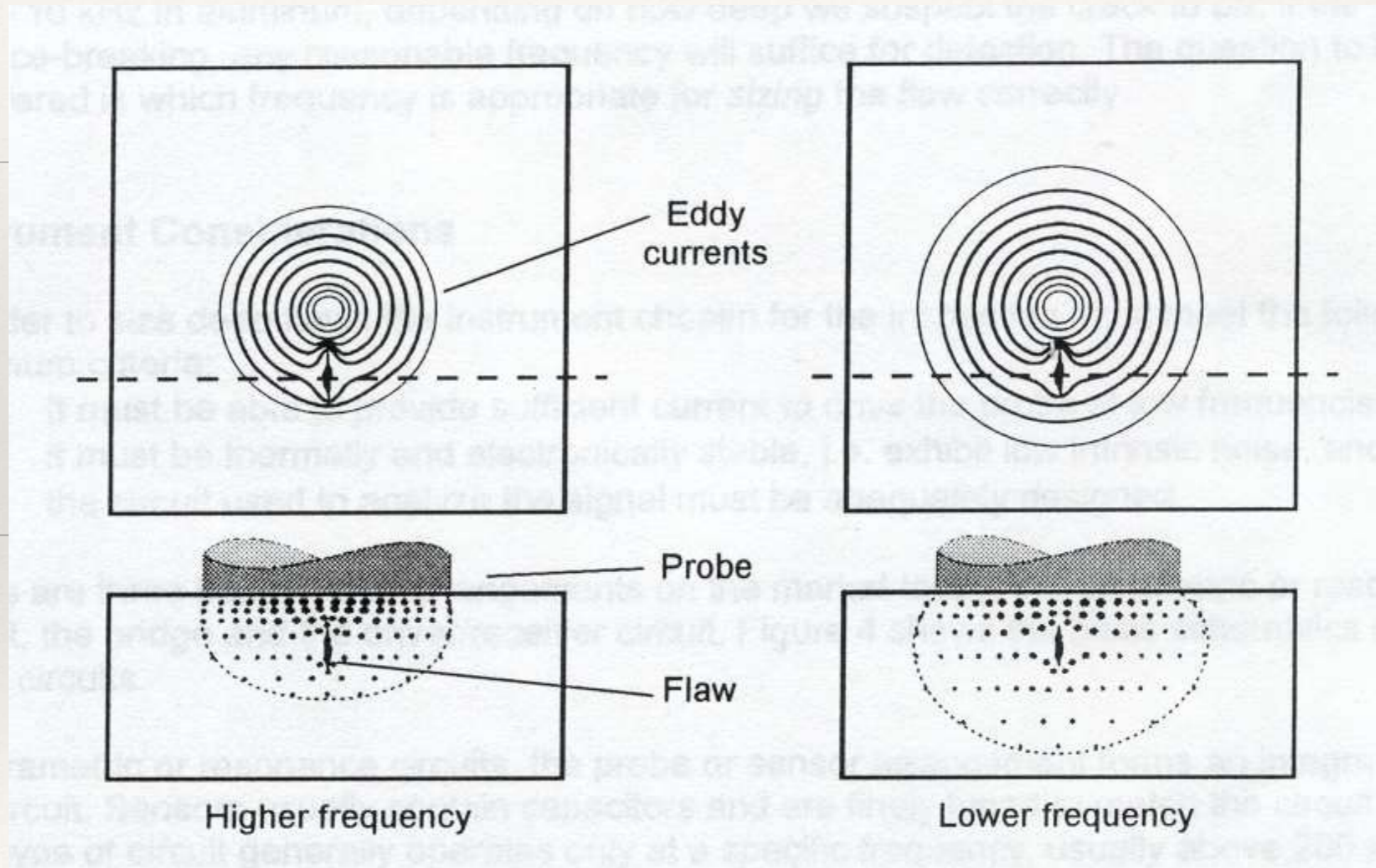
Corrientes de Eddy



Corrientes de Eddy

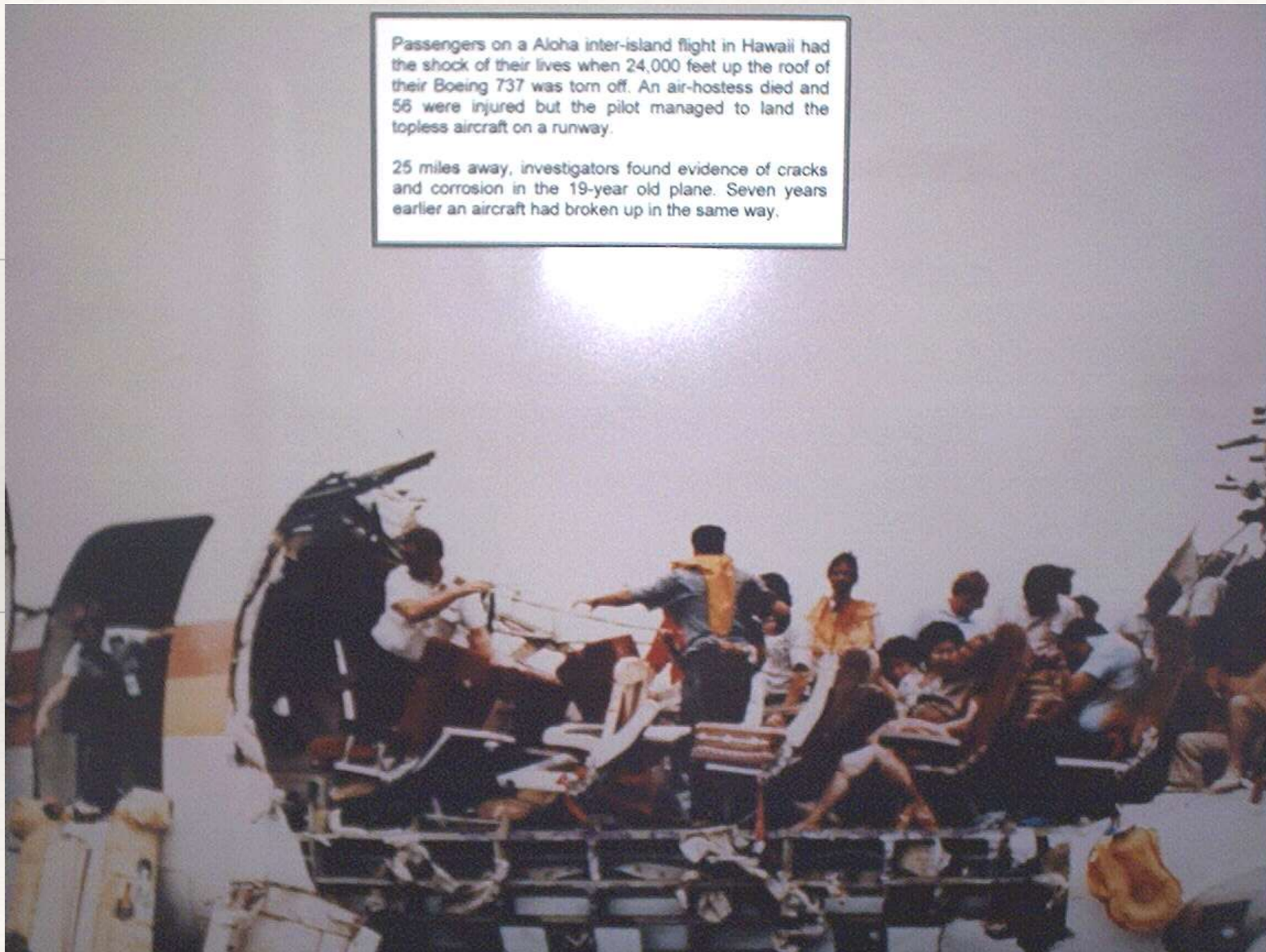


Corrientes de Eddy

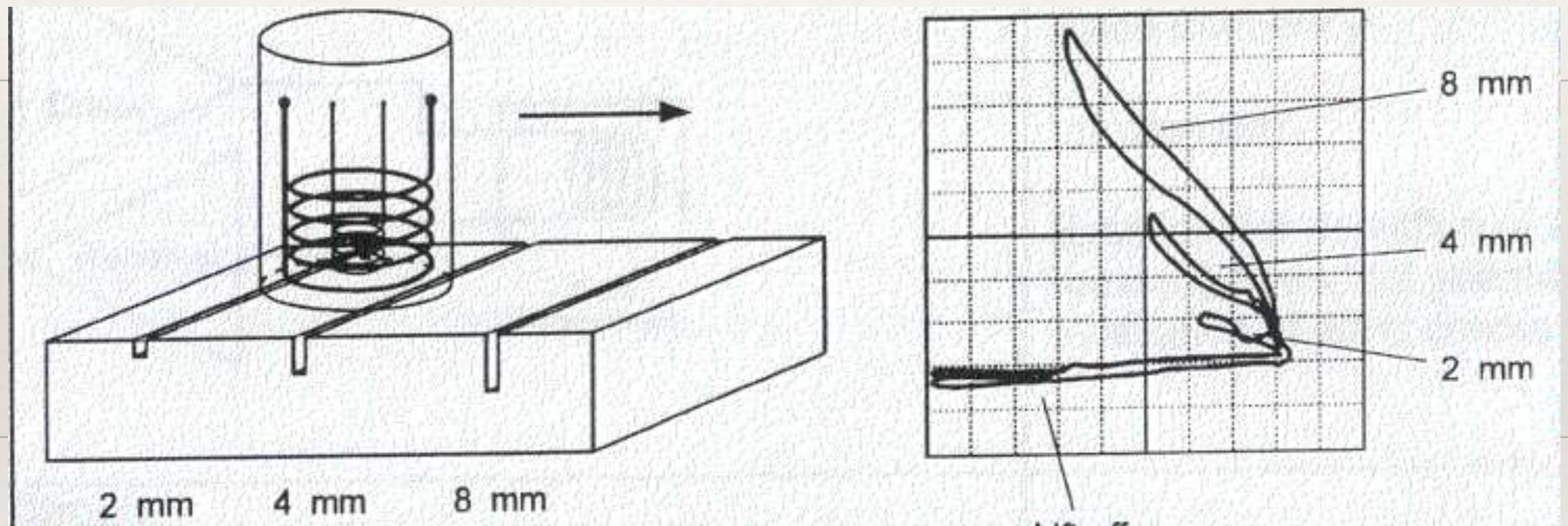


Passengers on a Aloha inter-island flight in Hawaii had the shock of their lives when 24,000 feet up the roof of their Boeing 737 was torn off. An air-hostess died and 56 were injured but the pilot managed to land the topless aircraft on a runway.

25 miles away, investigators found evidence of cracks and corrosion in the 19-year old plane. Seven years earlier an aircraft had broken up in the same way.



Corrientes de Eddy



Aplicaciones

Las aplicaciones resultan de la sensibilidad a múltiples variables:

Cambios en conductividad.

Presencia de discontinuidades superficiales o subsuperficiales.

Espacio entre la bobina y el material (Lift Off o Fill factor)

Espesor del material

Espesor de Electro-deposición en un material base.

Espacio entre materiales conductivos.

Variaciones en permeabilidad magnética

Principales campos de aplicación

Inspección automática o en línea de tubos, barras y alambres.

Inspección de motores y estructuras aero-espaciales.

Medición de espesor de pinturas y plásticos.

Ordenamiento de materiales

Otros

Ventajas de las Corrientes de Eddy

La sensibilidad a muchas variables permite gran flexibilidad.

Posibilidad de equipos pequeños y portátiles.

Altamente No Destructivo.

Pruebas usualmente instantáneas.

Ventajas de las Corrientes de Eddy

Ideal para pruebas “Go - No Go”.

Inocuo para el ser humano.

No requiere preparación previa o limpieza luego del ensayo.

Desventajas de las Corrientes de Eddy

La sensibilidad a muchas variables puede causar problemas.

El material debe ser conductor de la electricidad.

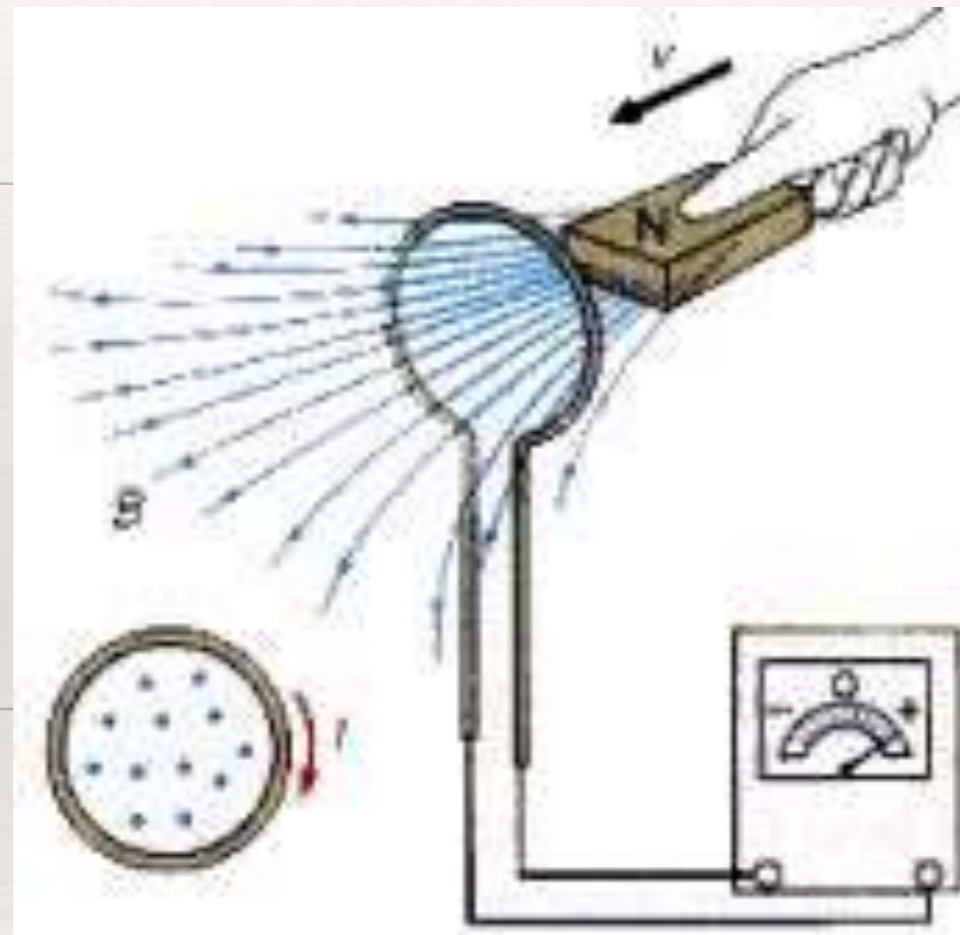
No puede penetrar materiales ferromagnéticos a no ser que sean saturados. (Limitados a ciertas geometrías y requiere demagnetización)

Desventajas de las Corrientes de Eddy

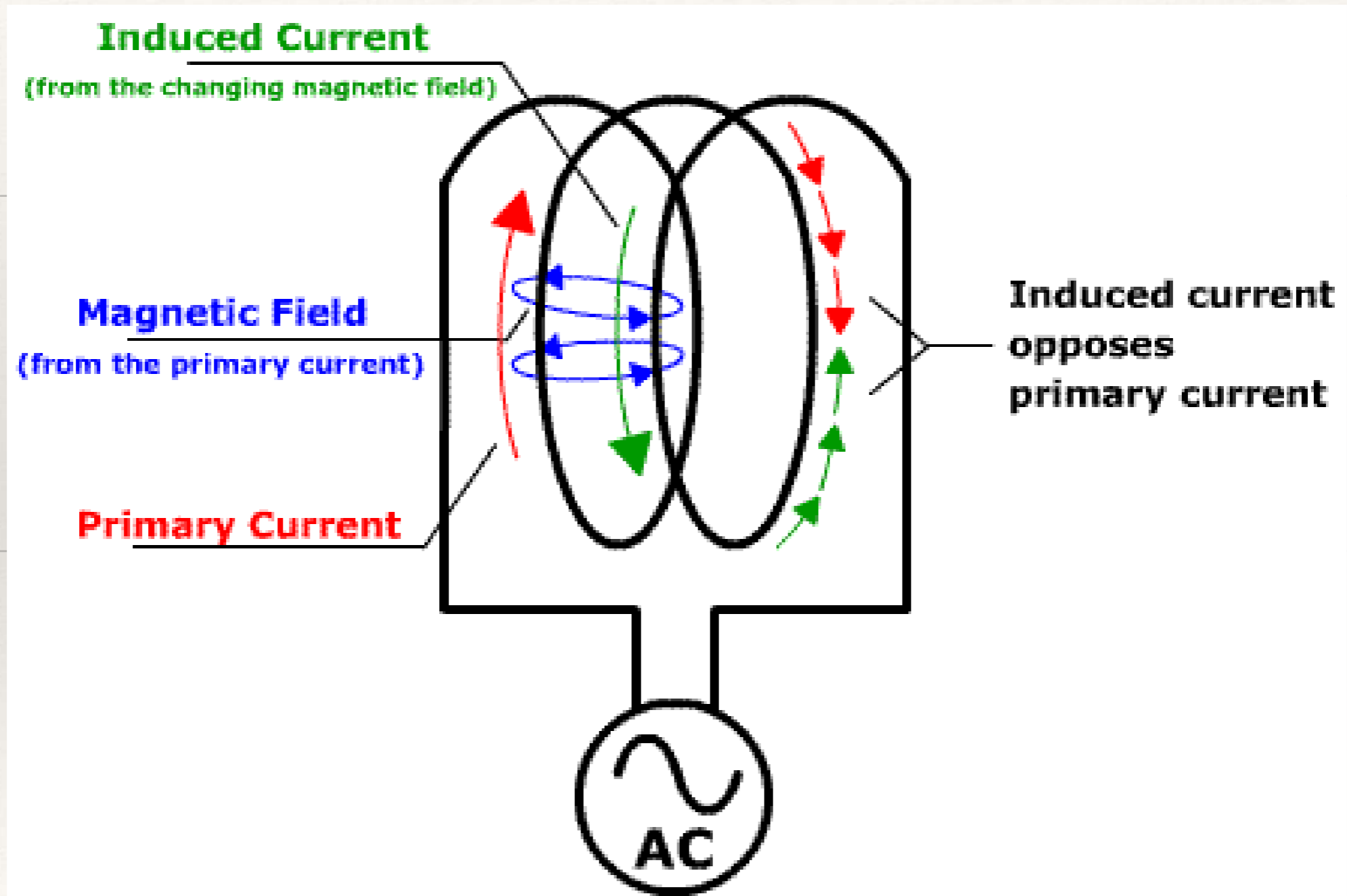
Penetración limitada hasta en materiales no ferromagnéticos.

Teoría algo compleja requiere entrenamiento especializado.

Ley de Lenz



Ley de Lenz



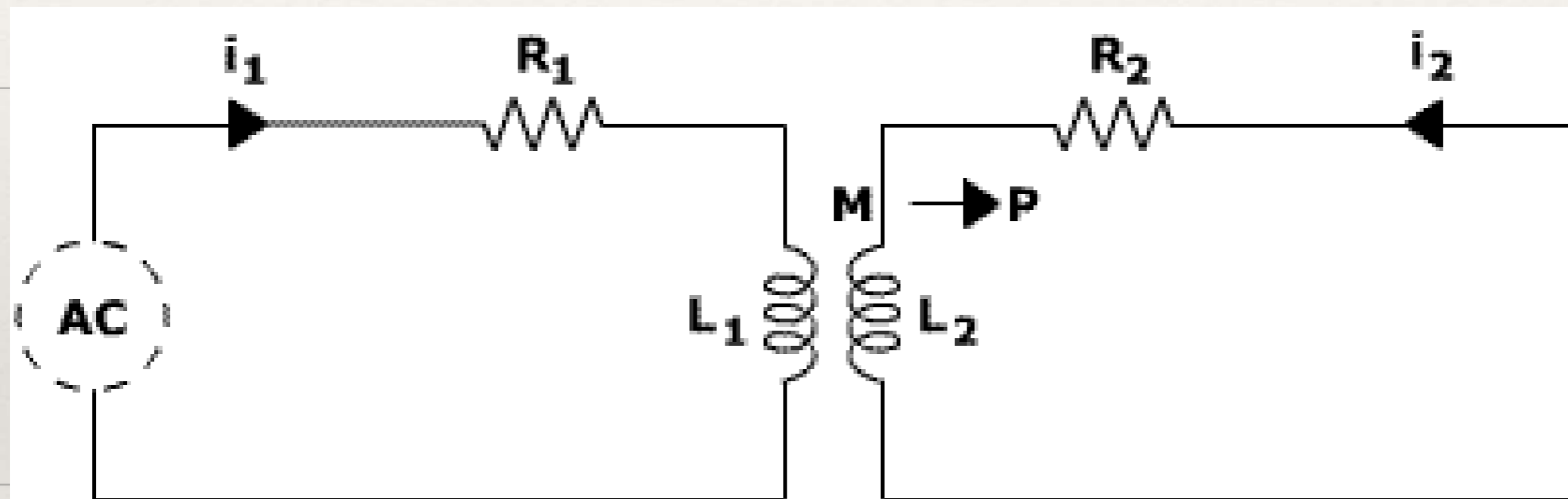
Inductancia Reactiva

Se denomina inductancia reactiva a la oposición de una bobina a cambios en la corriente que pasa por ella.

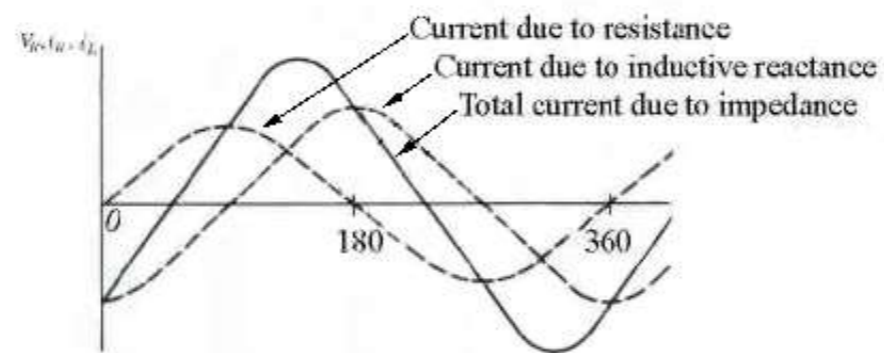
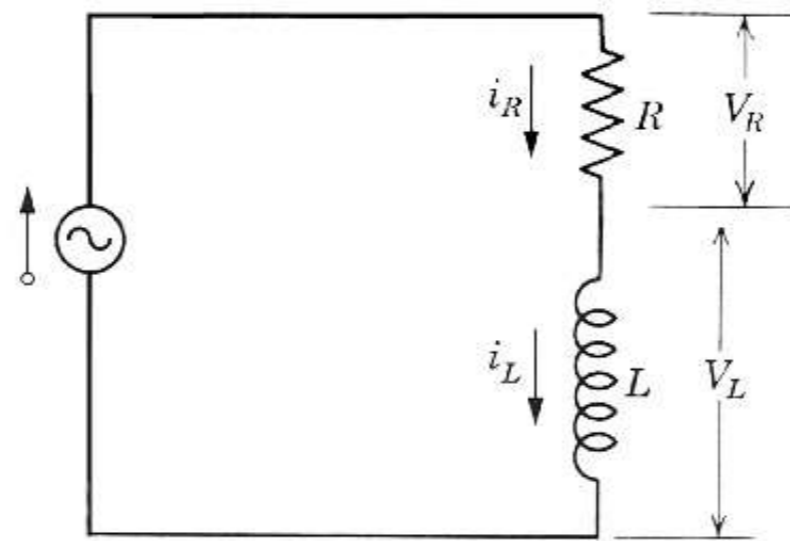
La inductancia reactiva depende de el diseño de la bobina y la frecuencia de trabajo.

Cuando más líneas de fuerza cruzan la bobina por unidad de tiempo, mayor inductancia reactiva.

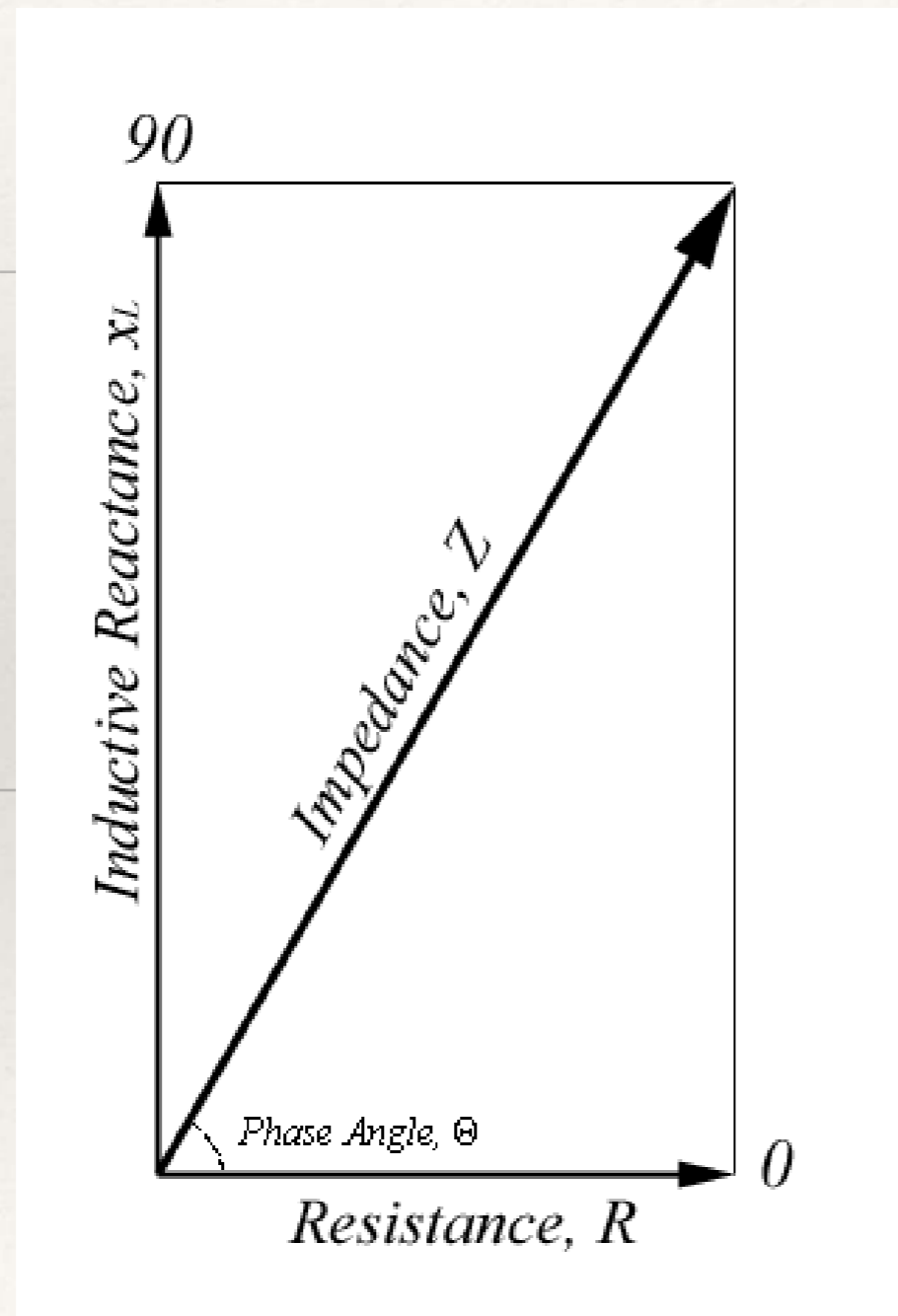
Inducción mutua



Circuito Mixto



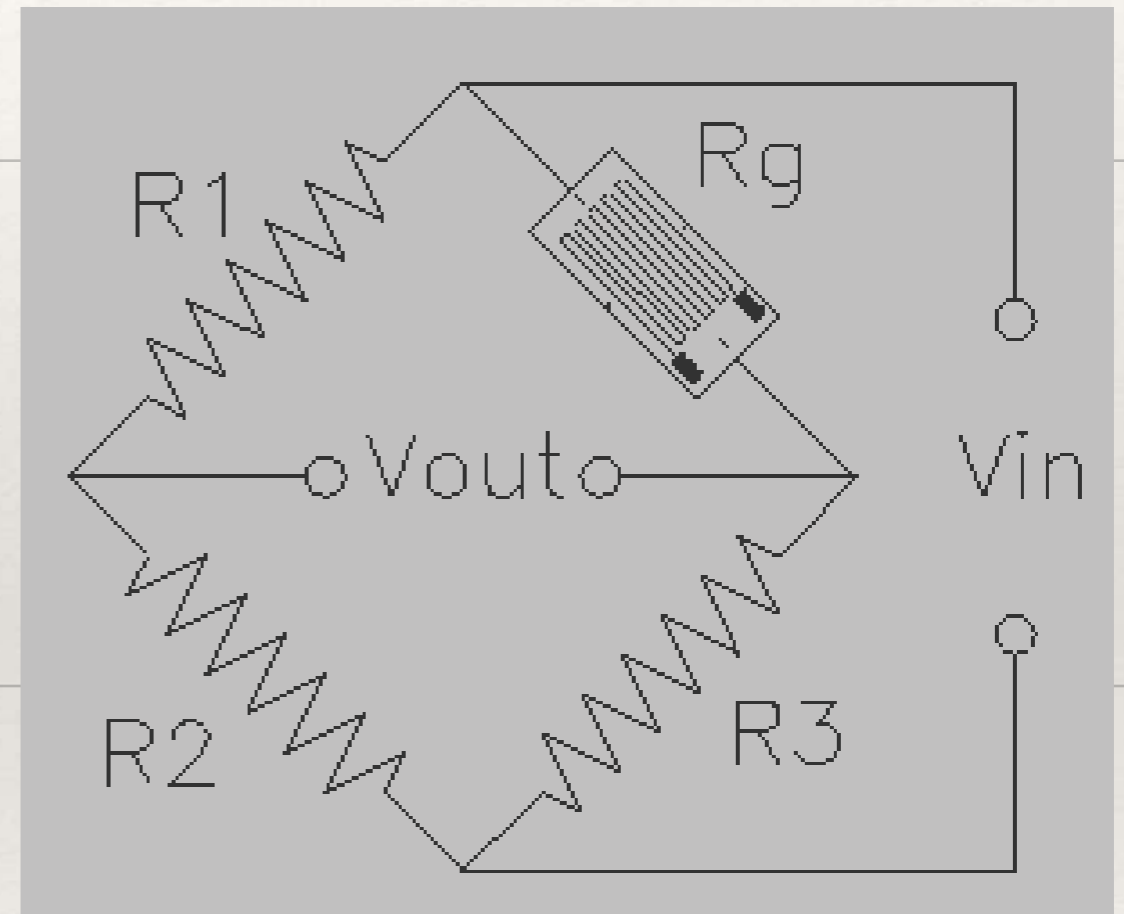
Impedancia Amplitud y Fase

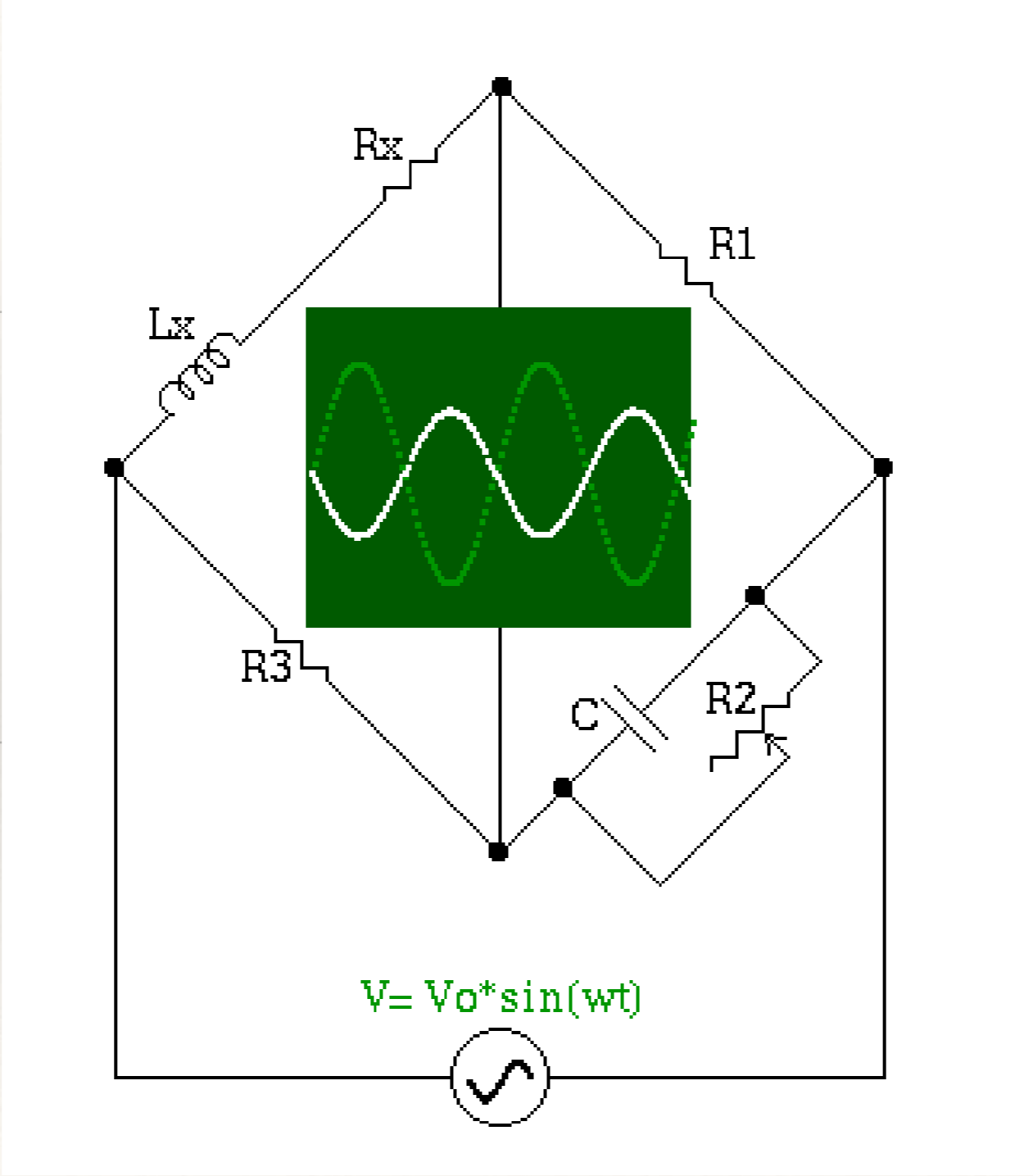


$$Z = \sqrt{(X_L^2 + R^2)}$$

$$\Theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

Puente Wheatstone





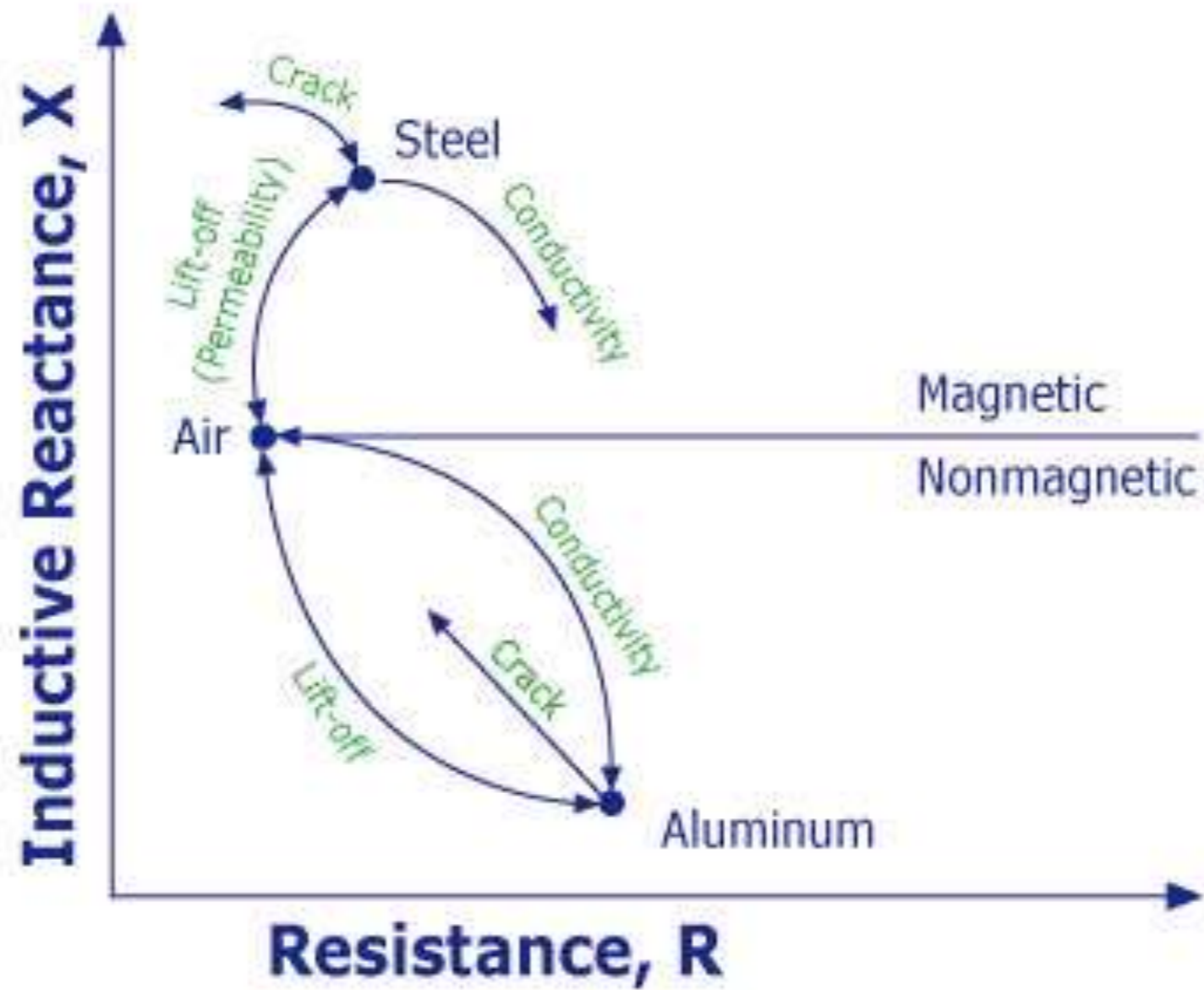
Plano de Impedancia y Corrientes de Eddy

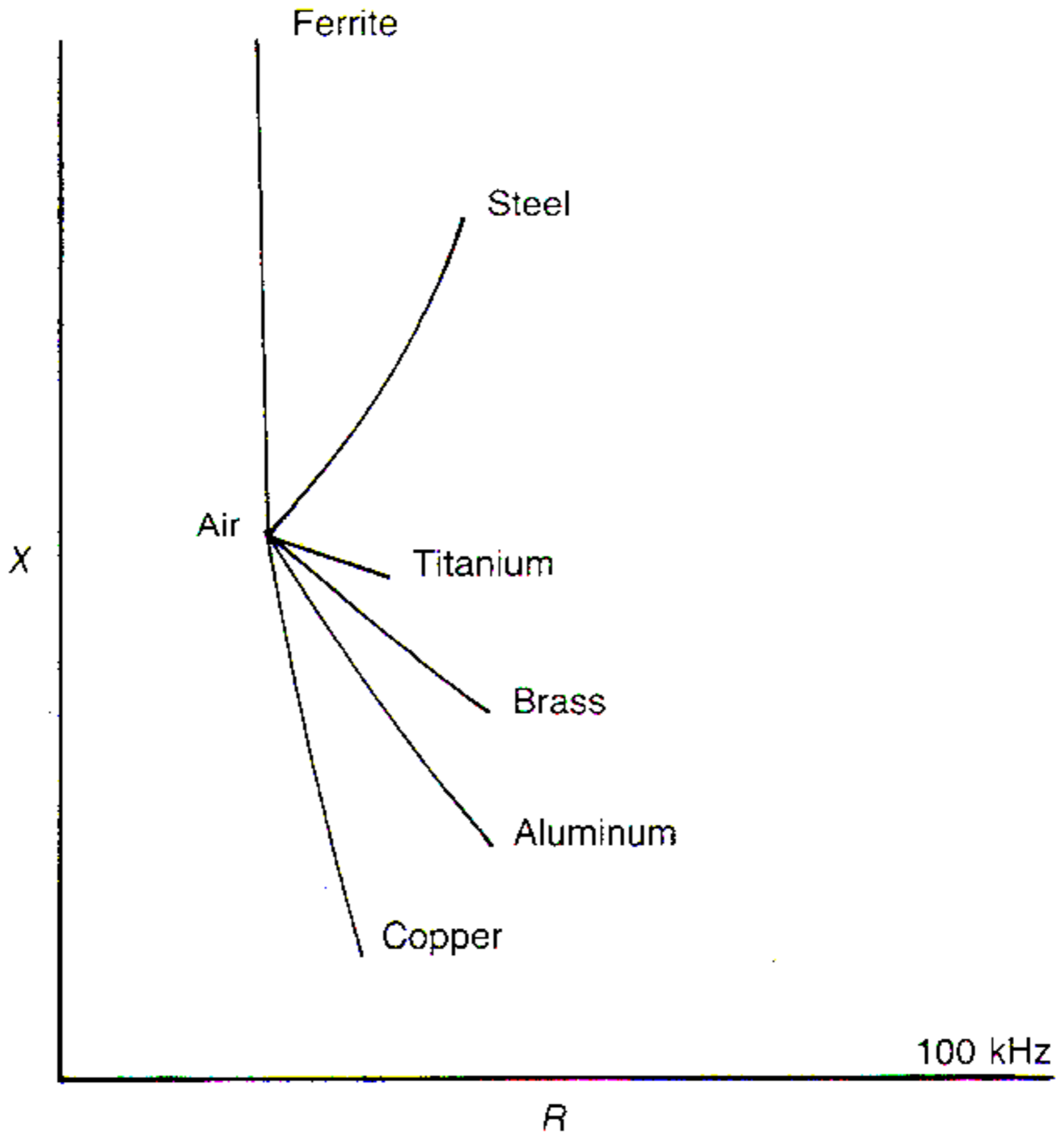


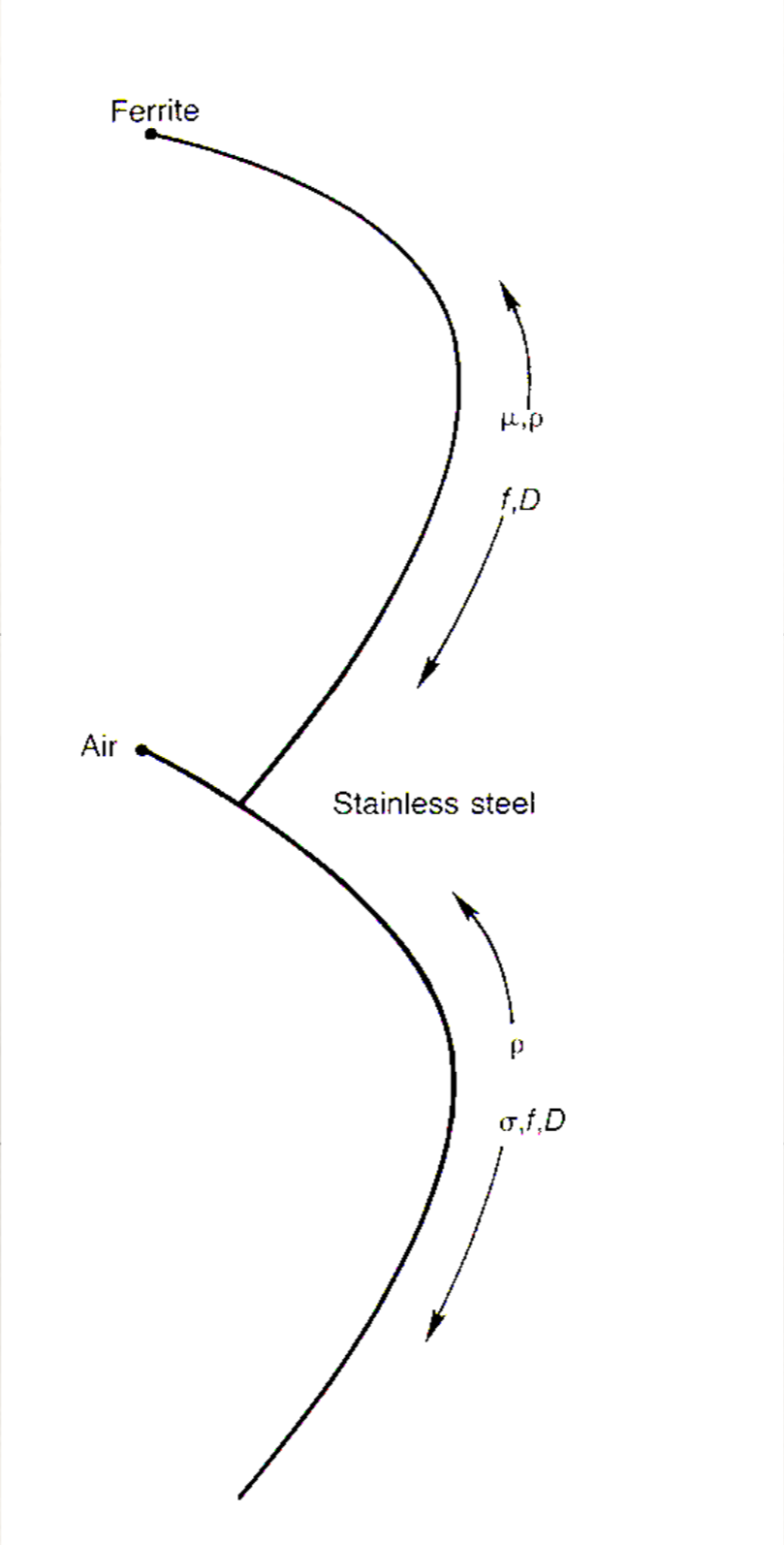
**Founder
Prof. Friedrich Förster
1908 - 1999**



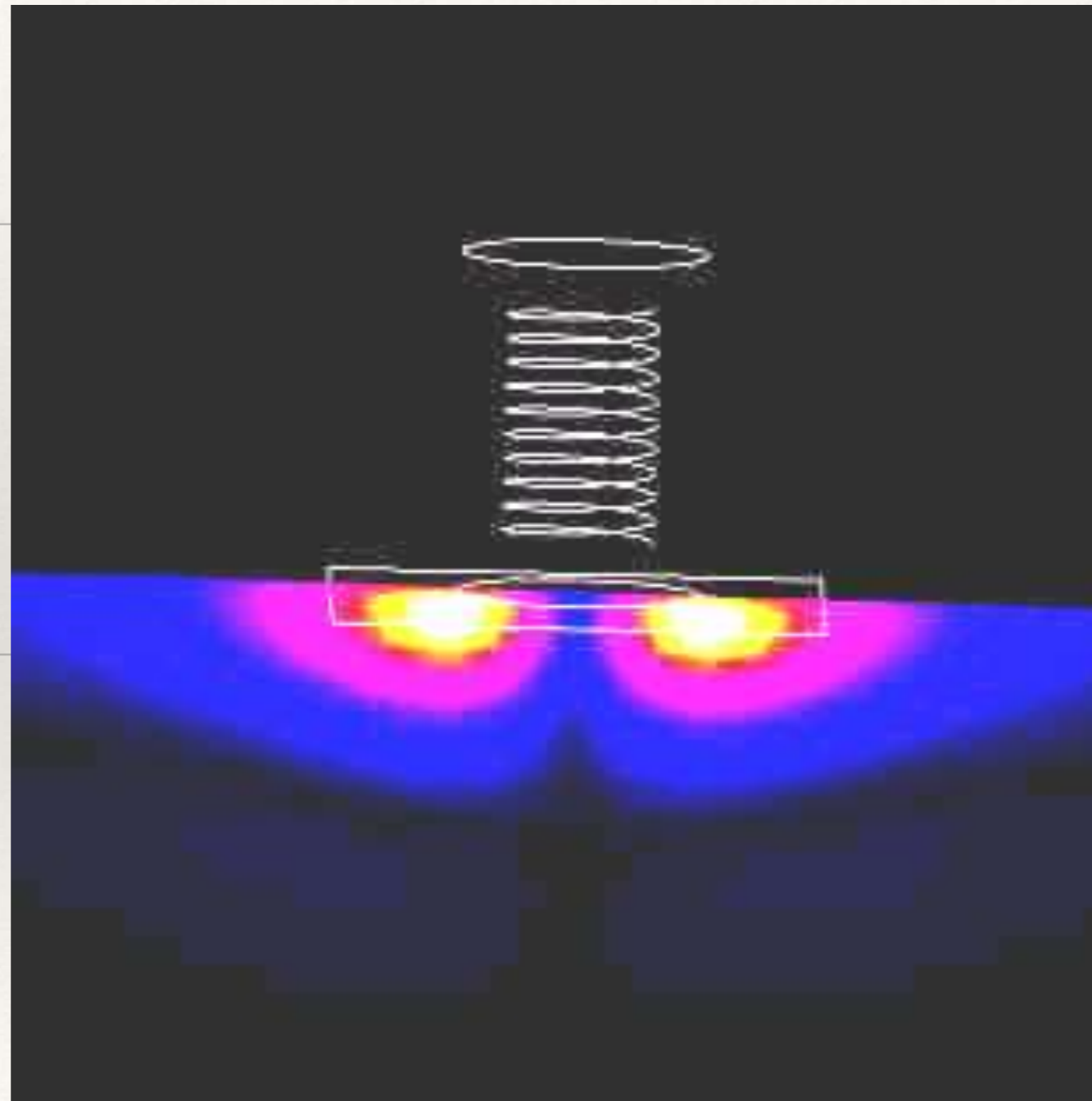
Eddy Current Impedance Plane Responses



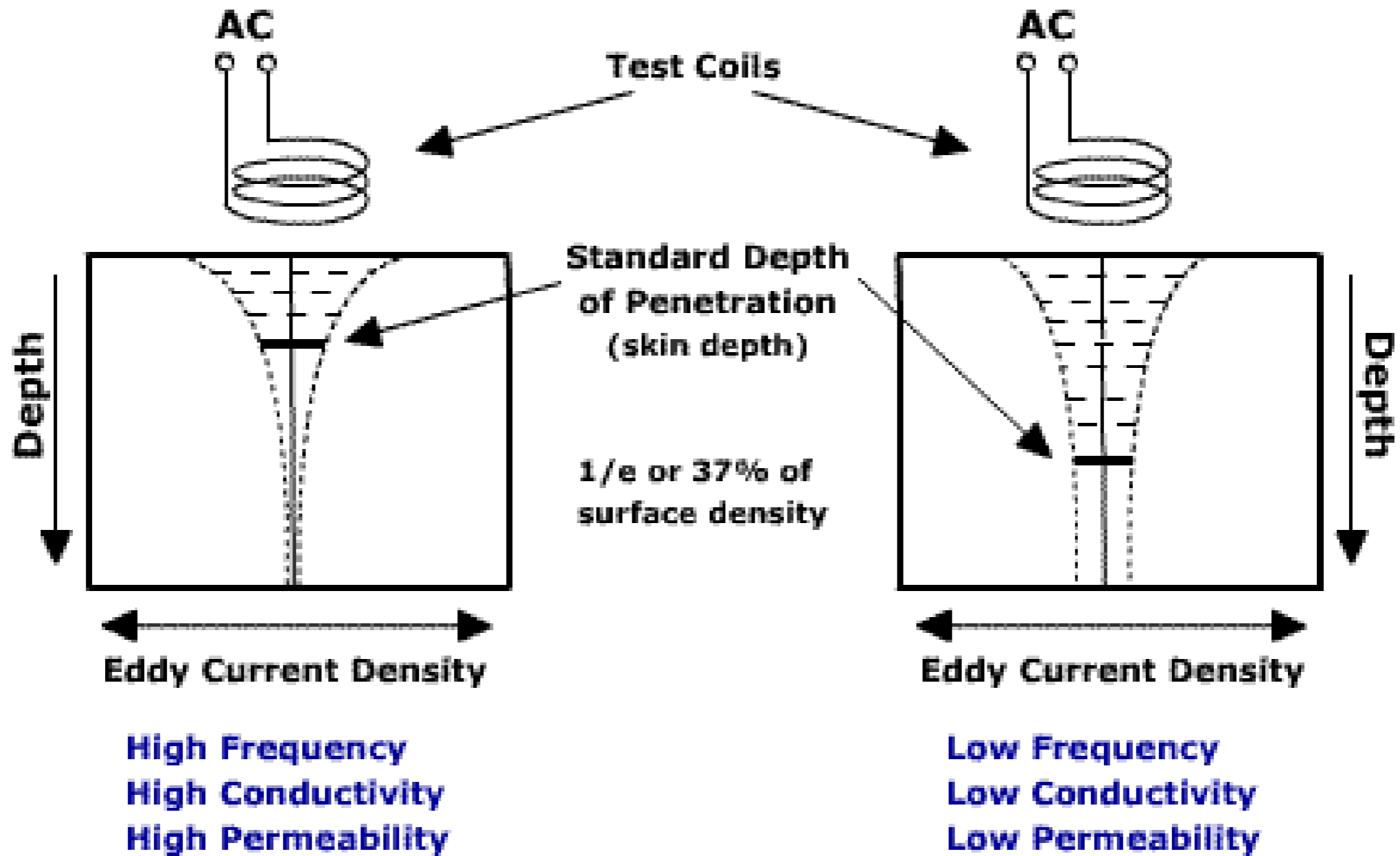




Profundidad Estándar de Penetración

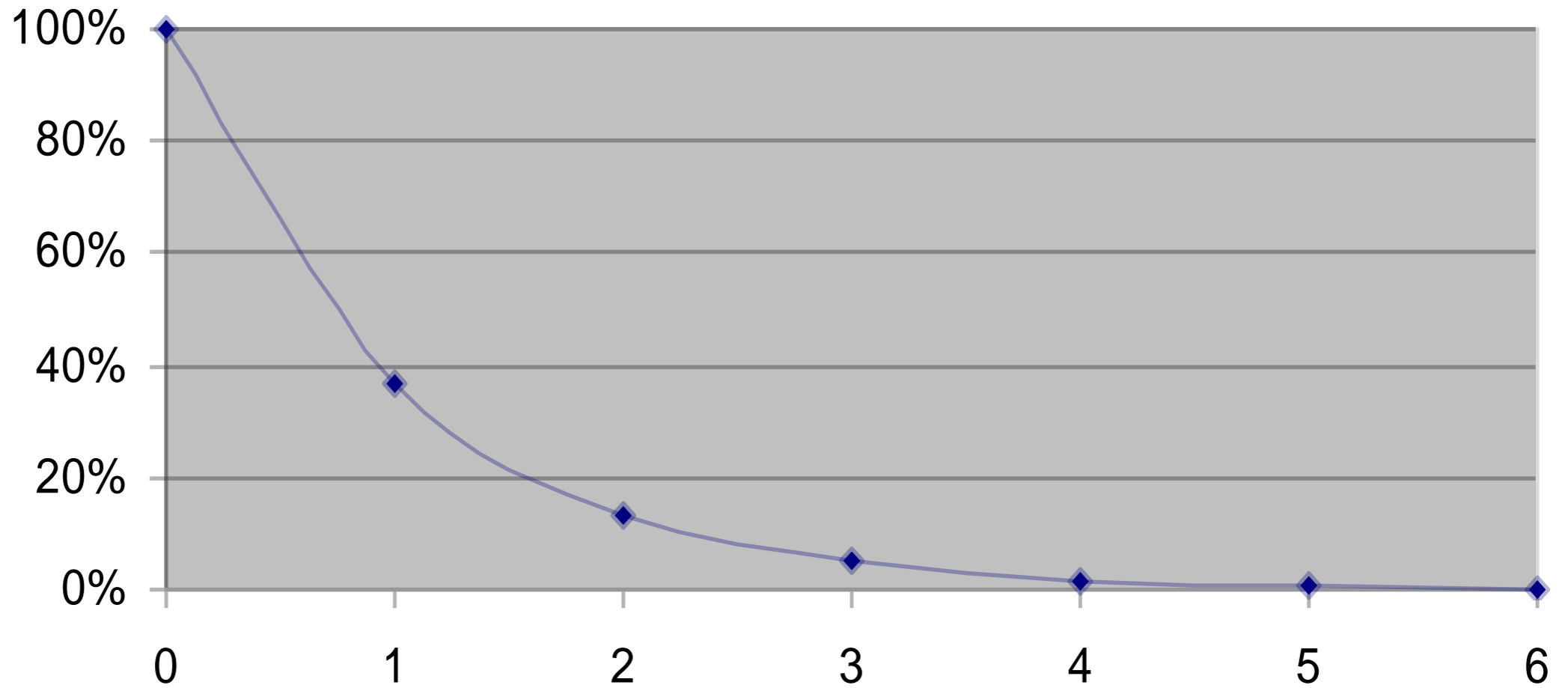


Eddy Current Depth of Penetration



Profundidad Estándar de Penetración

Densidad Relativa de las
Corrientes



Standard Depth of Penetration	Densidad de las Corrientes de Eddy	Phase Lag en Radianes
0	100.0%	0
1	36.8%	1
2	13.5%	2
3	5.0%	3
4	1.8%	4
5	0.7%	5

Profundidad Estándar

$$d \text{ (in)} = 1.98 * (r / (f * m_r))^{-1/2}$$

$$d \text{ (in)} = 25.998 * (1 / (s * f * m_r))^{-1/2}$$

$$d \text{ (mm)} = 660.7 * (1 / (s * f * m_r))^{-1/2}$$

Donde:

d = Profundidad Estándar de Penetración

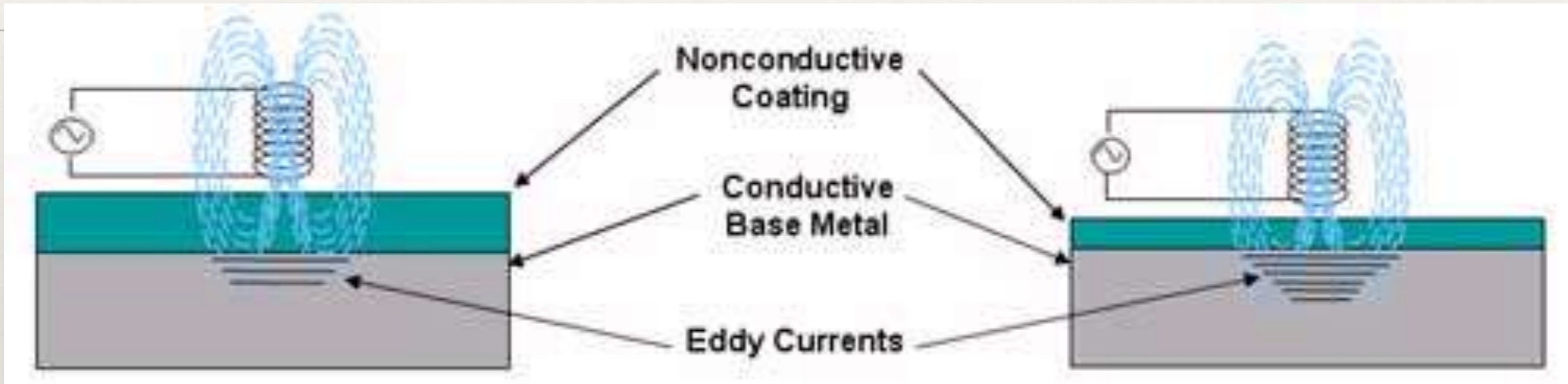
r = resistividad (mV/m)

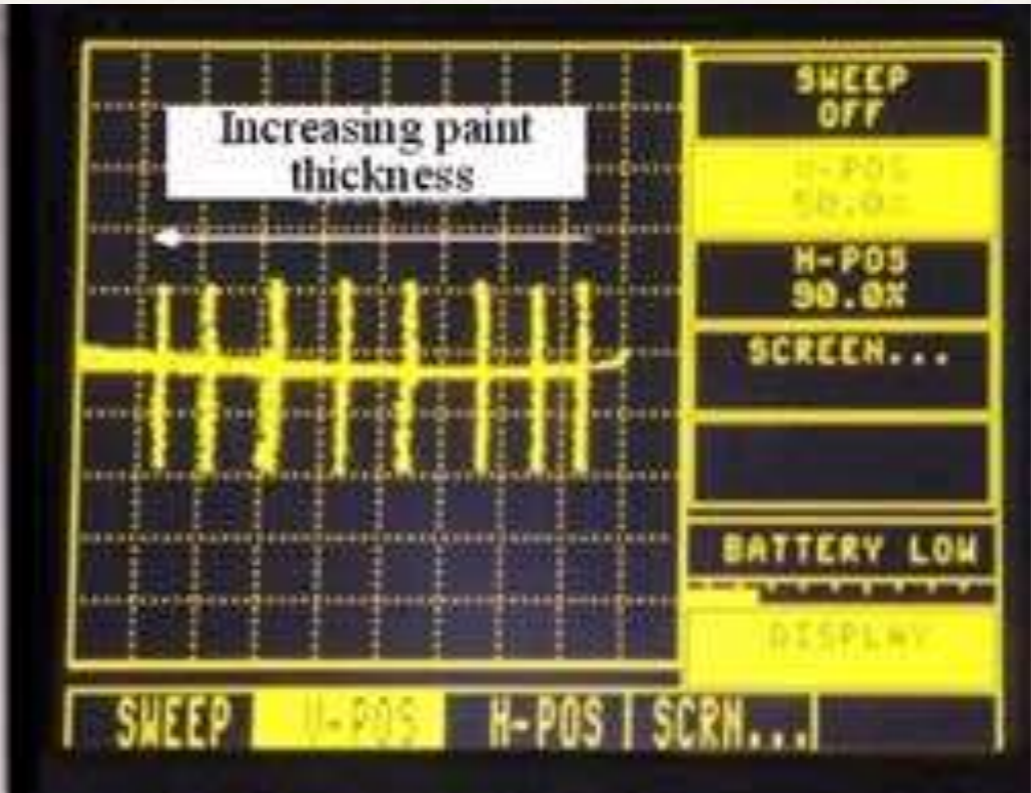
1 mV/m = 172.41/%IACS

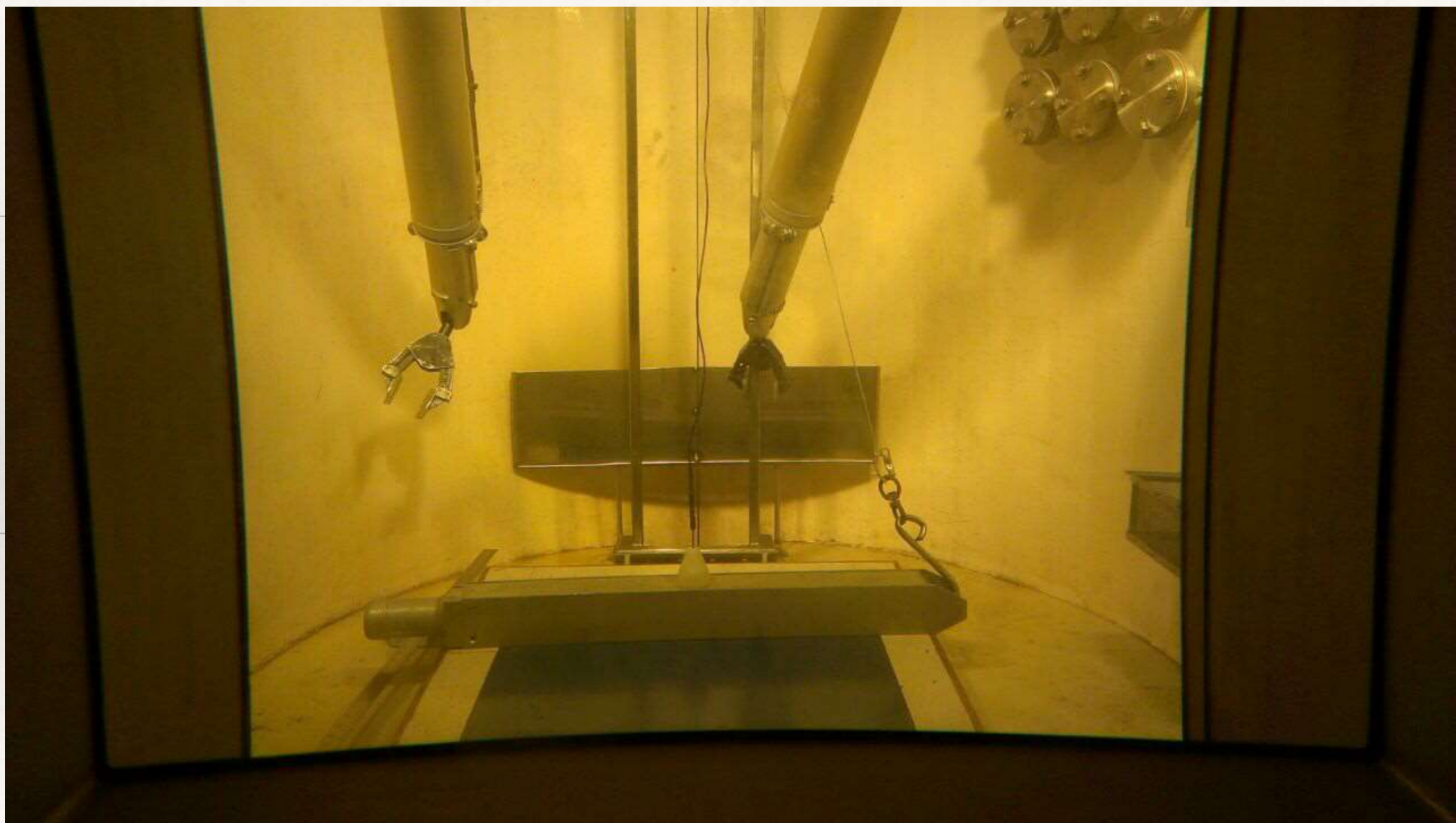
f = Frecuencia en Hz

s = conductividad en IACS

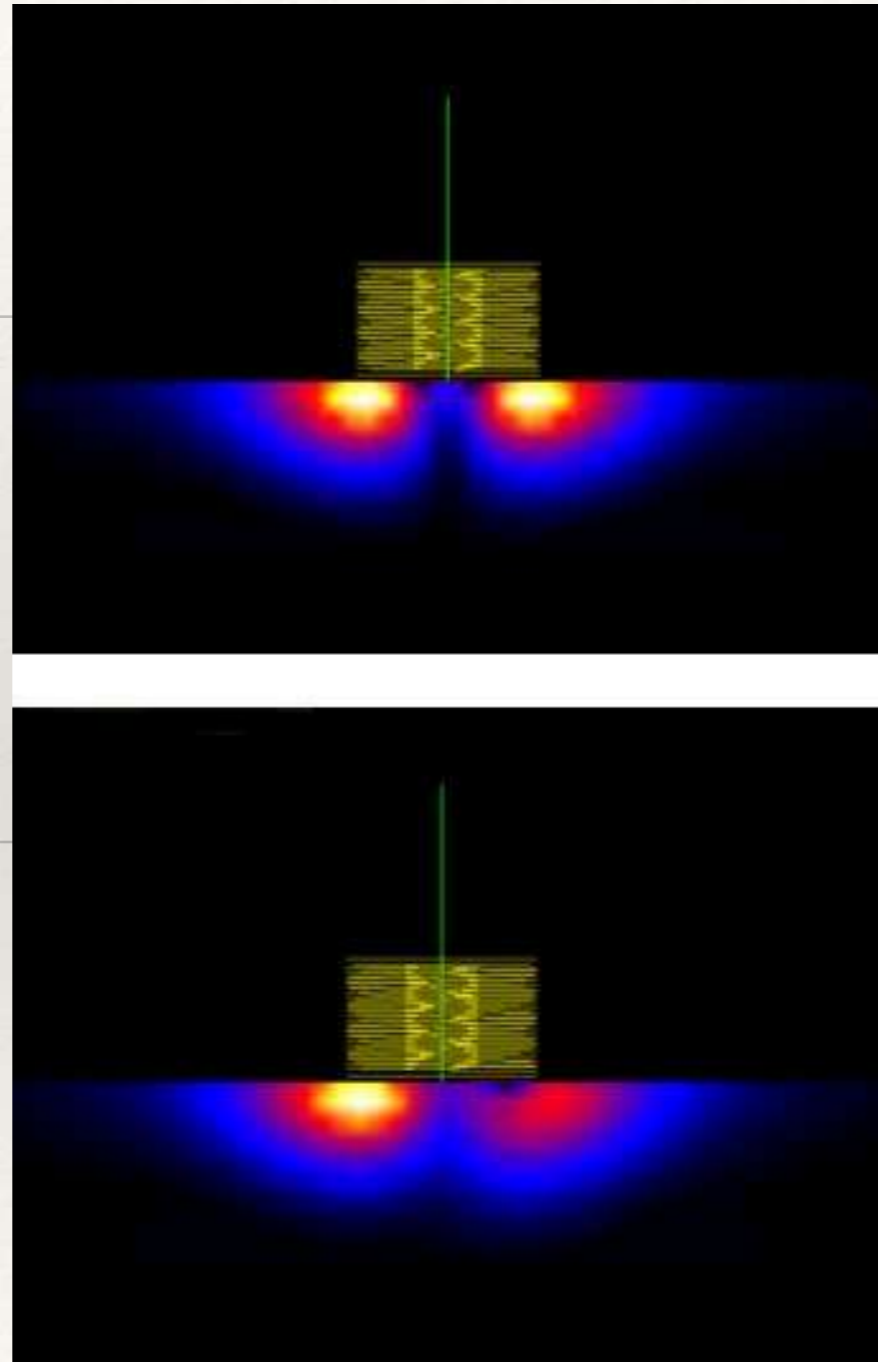
m_r = Permeabilidad relativa (1 para materiales no ferrosos)





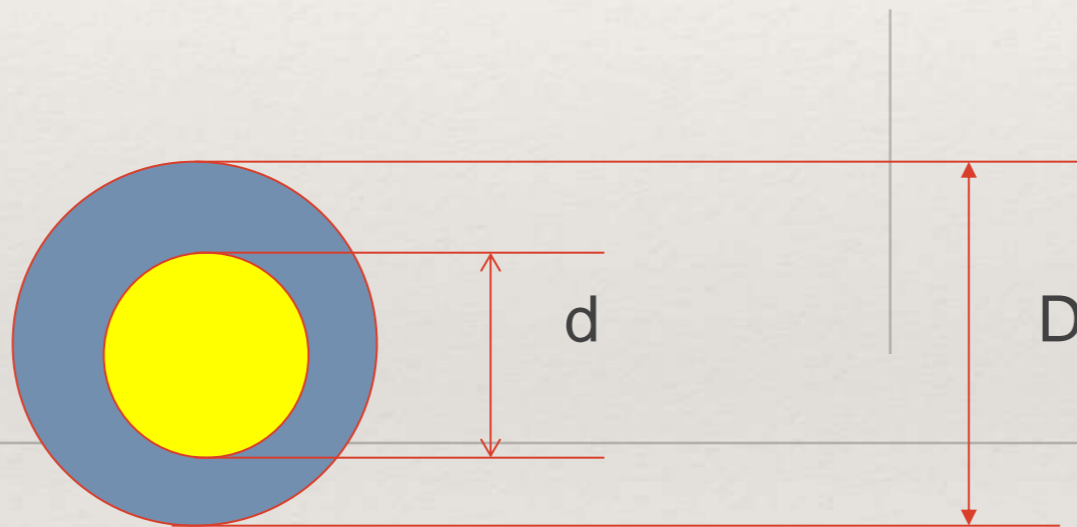


Fisura



Fill Factor

$$h = d^2/D^2$$





Configuraciones Básicas

Superficial (Surface)

Bobina Interior (Internal Coil)

Bobina Exterior (Encircling)

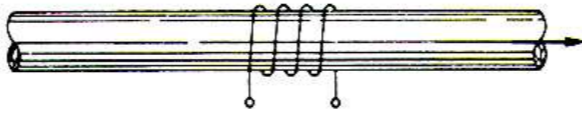
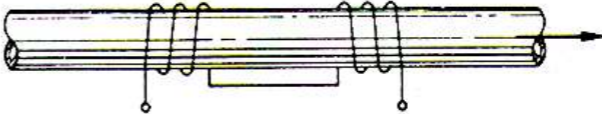

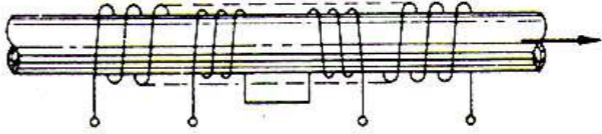
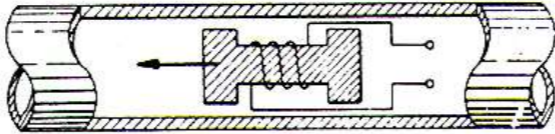
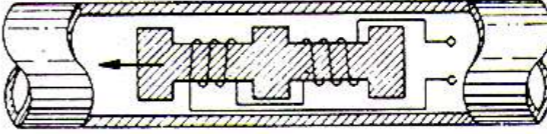
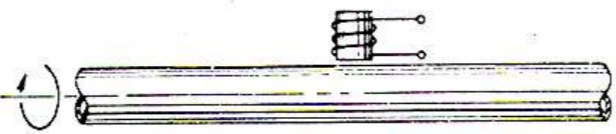
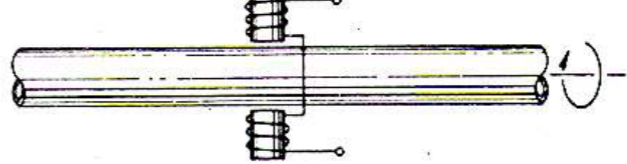
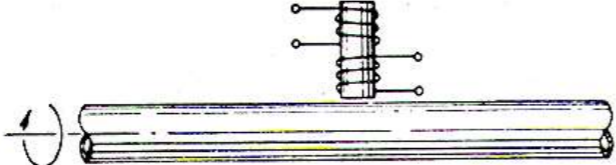
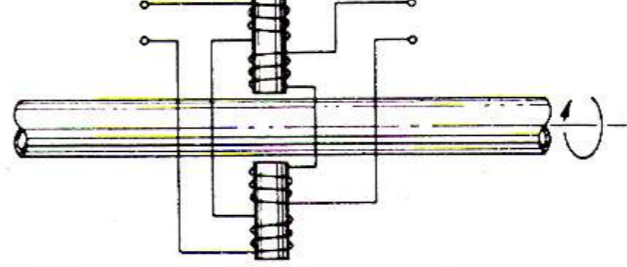
Modo de Operación

Absoluta (Absolute)

Diferencial (Differential)

Referencia Externa (External Reference)

Bobinas para tubos de diámetro pequeño

		Absolute	Differential
Encircling coils	Single		
	Double		
Bobbin coils			
Probe coils	Single		
	Double		

Bobinas Superficiales

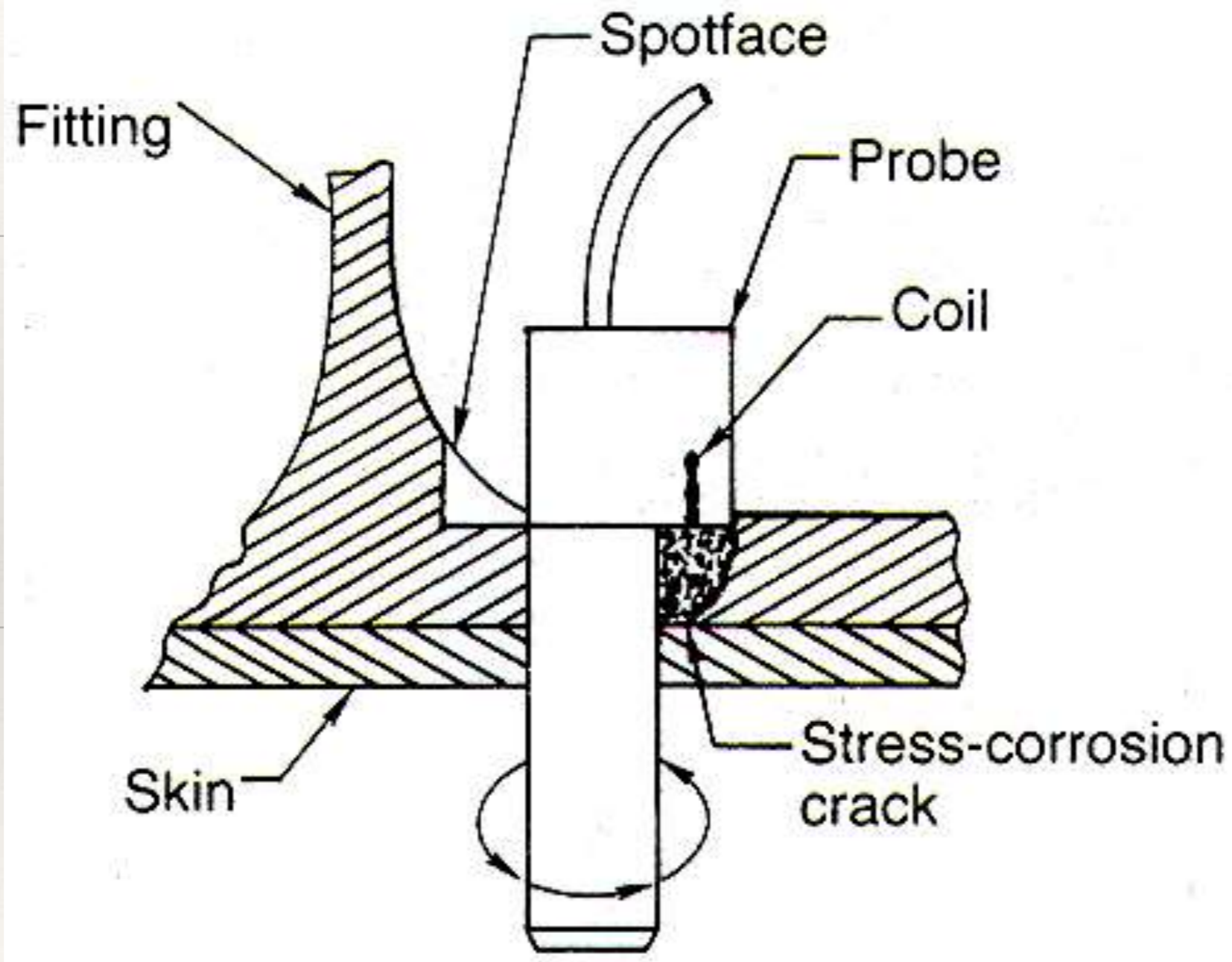
Las bobinas de menor diámetro son preferidas para encontrar fisuras pequeñas, y son menos sensibles a efectos de borde.

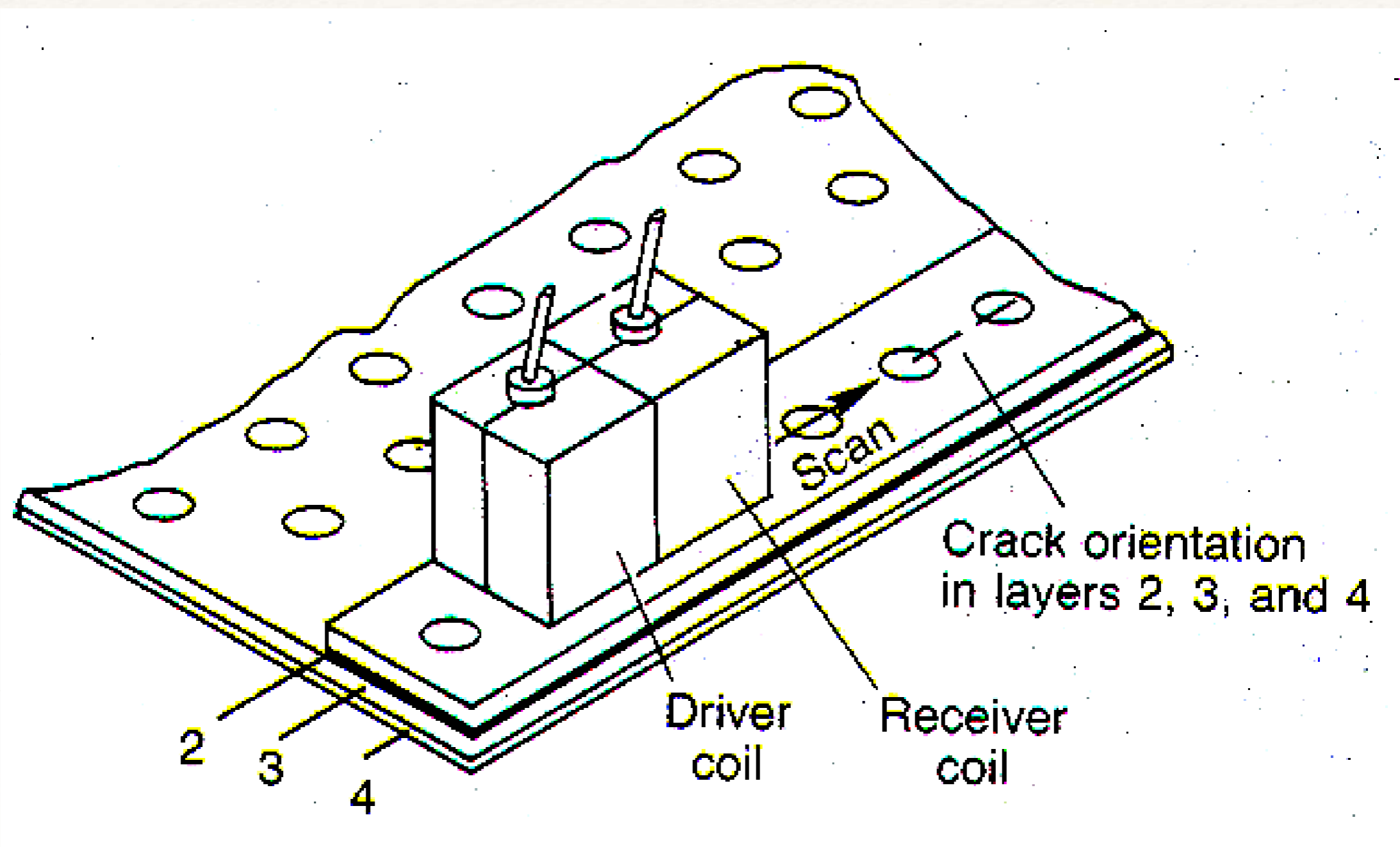


Las bobinas de mayor diámetro permiten escanear rápidamente, pero no pueden localizar la posición de pequeños defectos. Son muy buenas en pruebas de conductividad ya que promedian pequeñas variaciones localizadas.

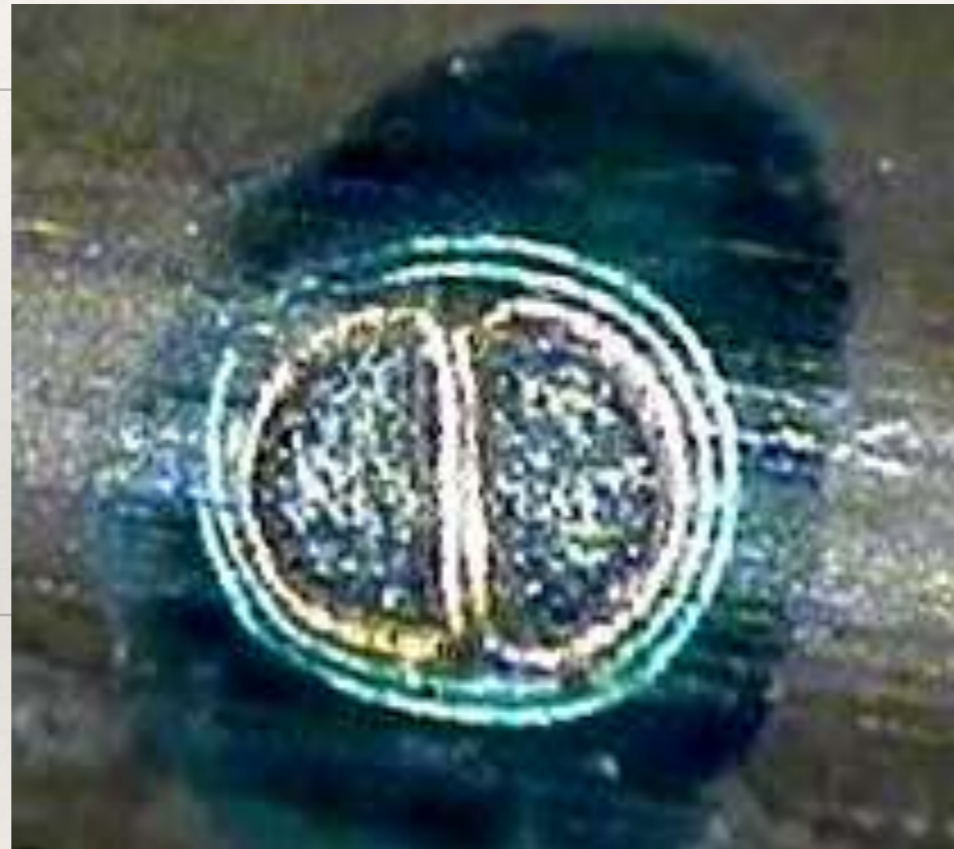
Inspección de agujeros (Spinning Coils)







Reflexión Diferencial





Bobinas Interiores (Internal Coils)

Pasan por el interior de tubos y son usadas usualmente para verificar la condición de dichos tubos (Corrosión o Fisuras).





Ectane[®] 2

Surface Array and Tube Inspection Test Instrument

Standard connectors

Outputs and alarm

Powerful saturation source and motor drive

Built-in, high-quality IRIS UT

SmartMUX™

Integrated, universal, and programmable ECA multiplexer with ultrafast nulling

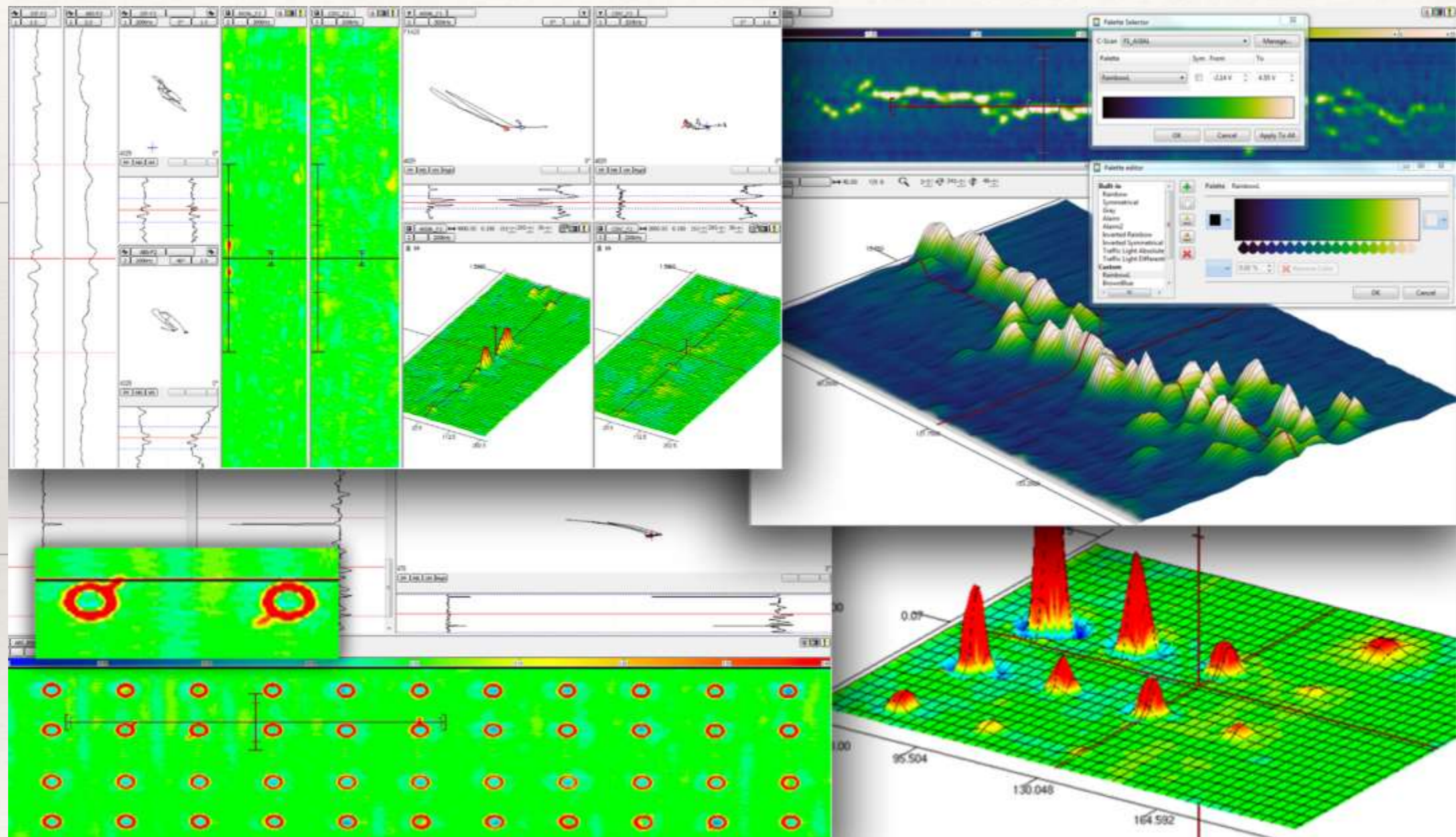
Multi-technology for tube inspections: ECT, ECA, RFT, NFT, MFL with full gain range, and surface ECA capabilities

8 hours of battery power and backup for 100% up time

Plug-and-play connectivity

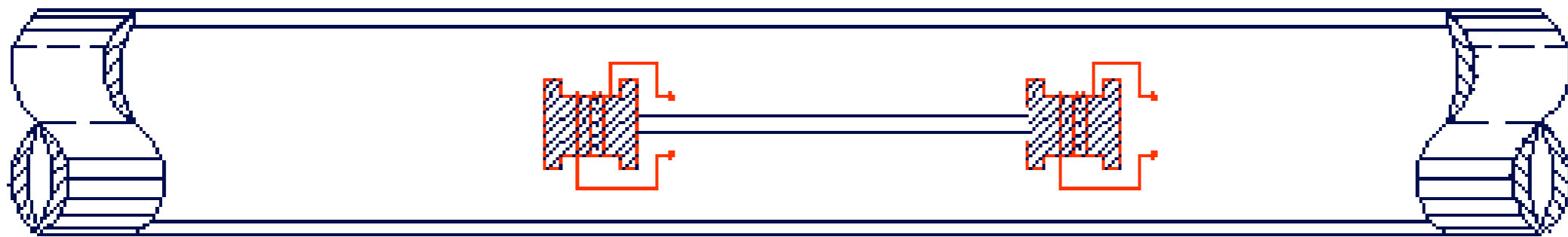


Eddy fi

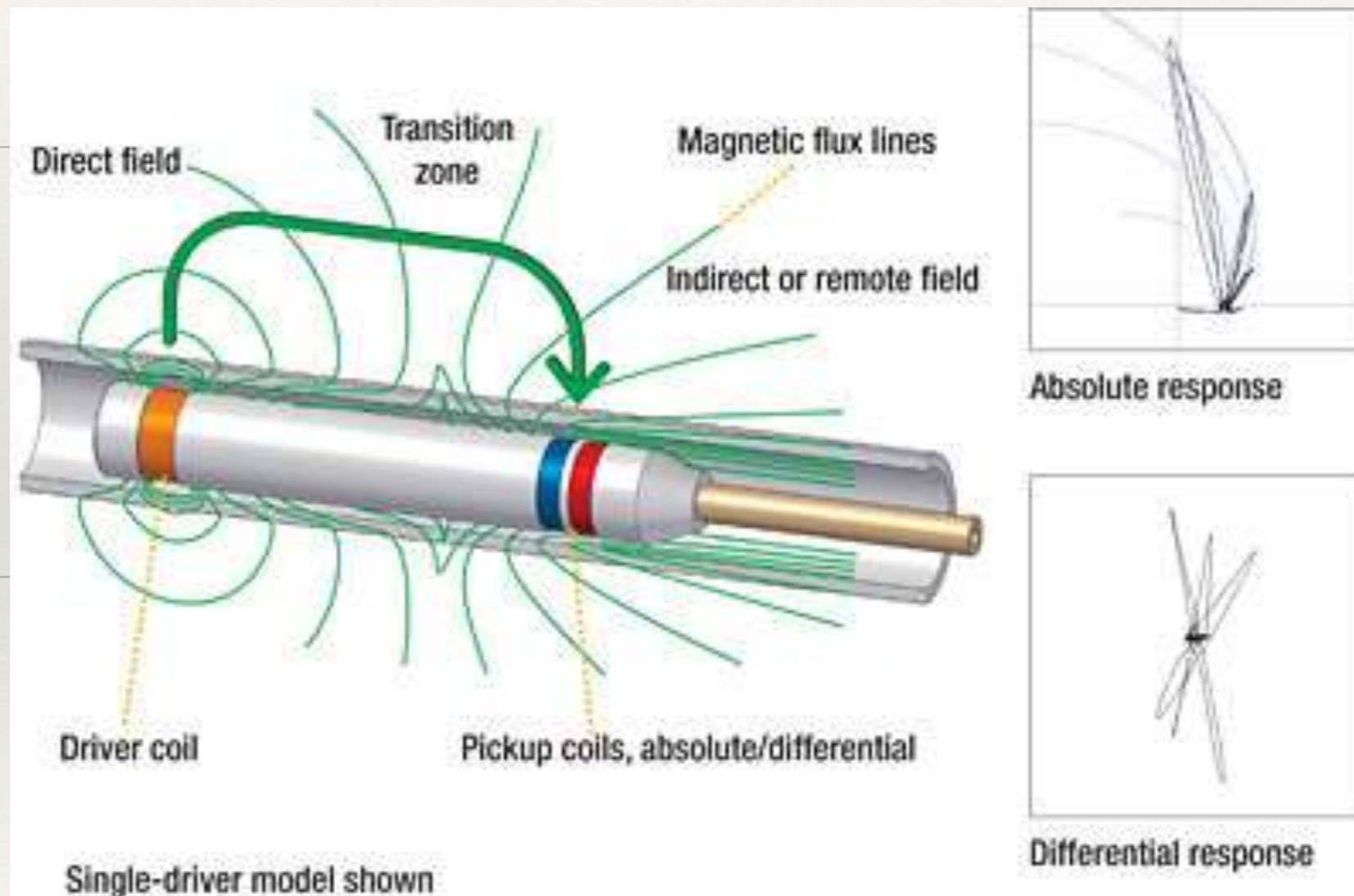




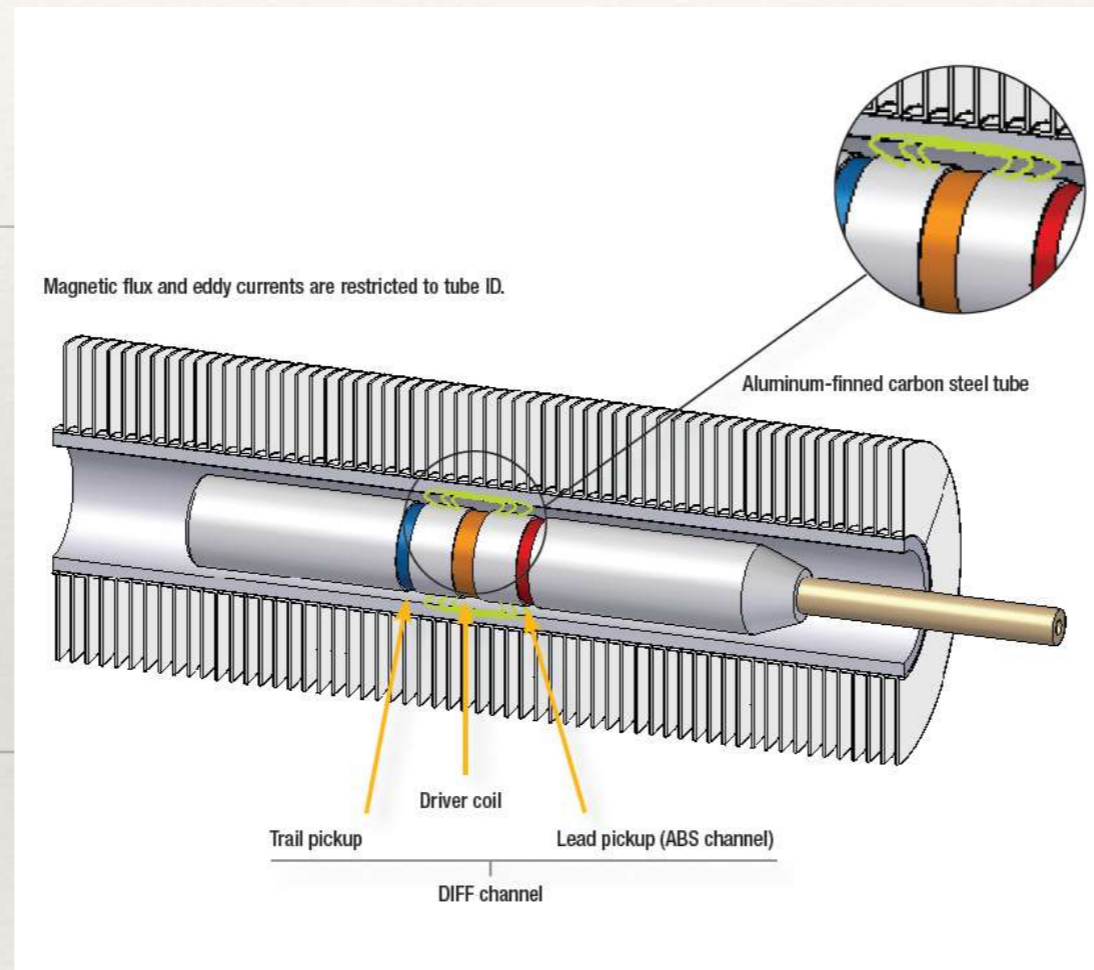
Remote Field Testing



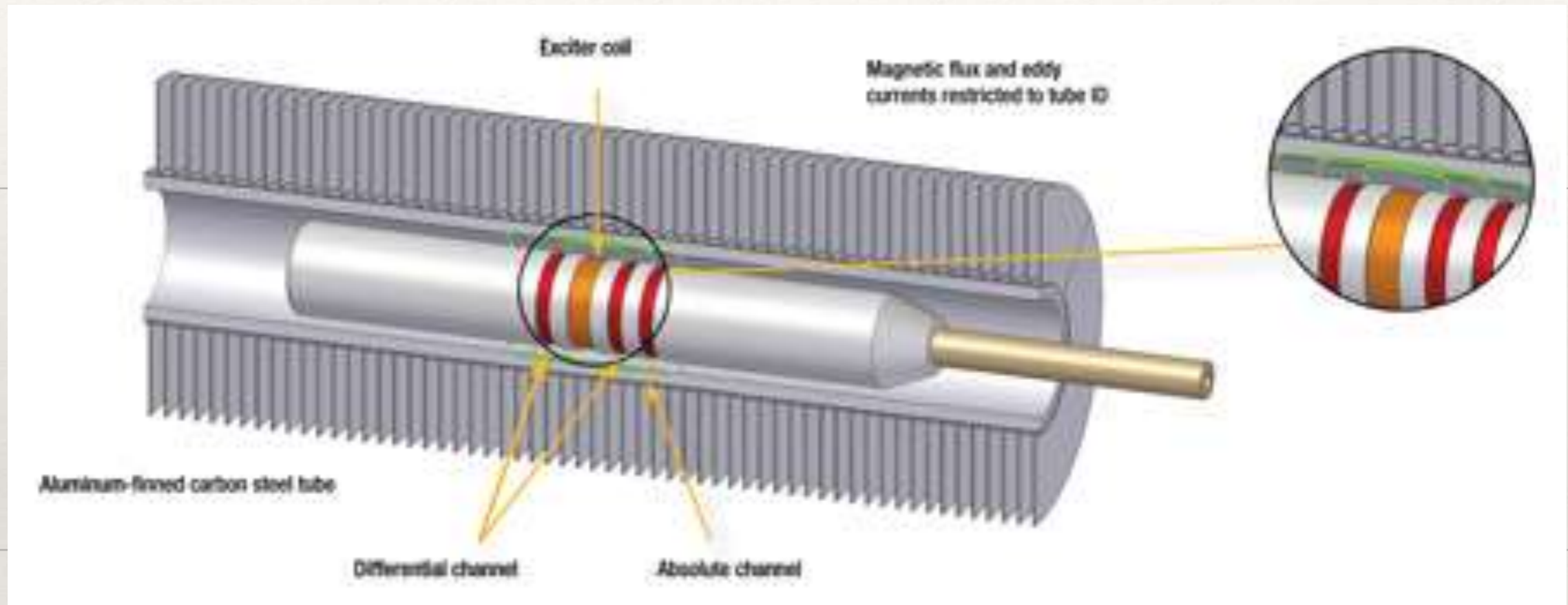
Remote Field Testing

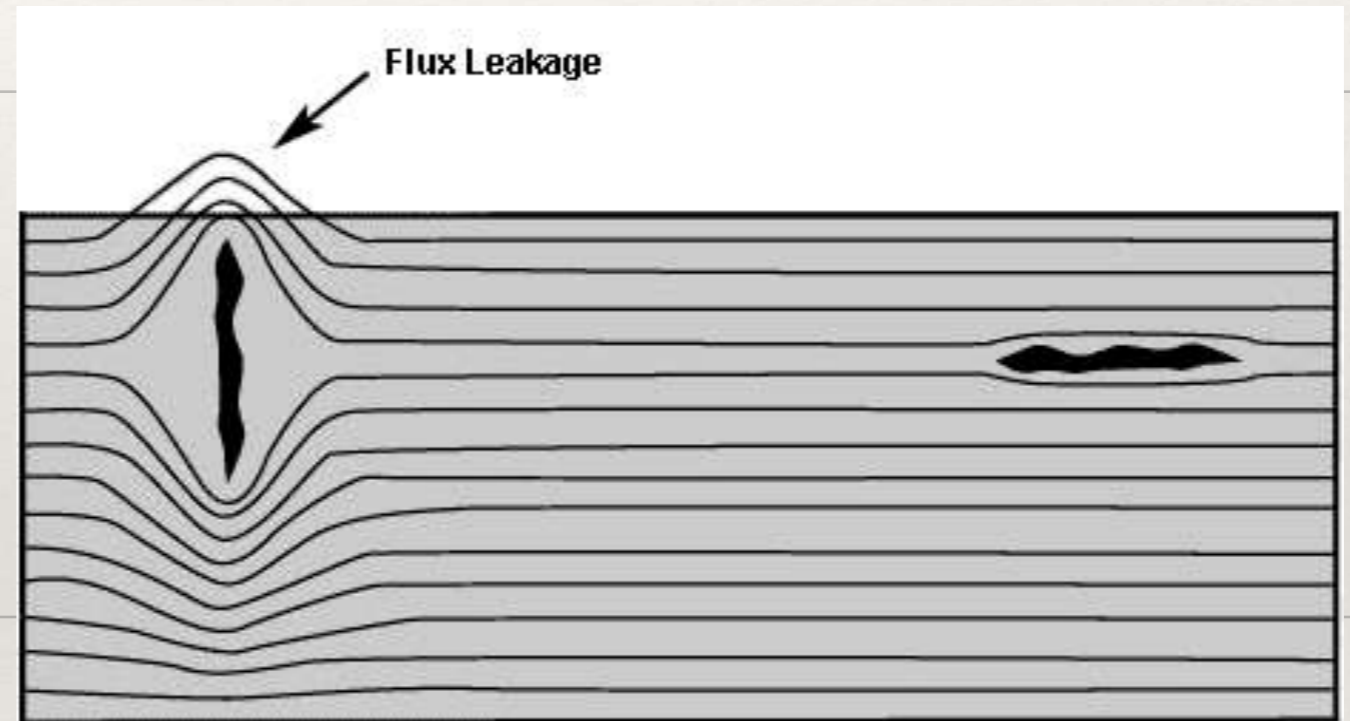
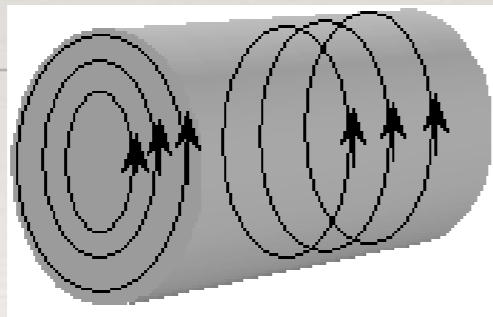
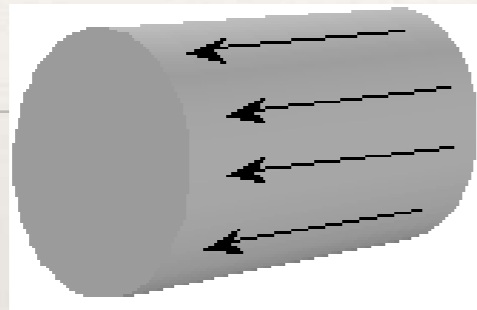


Near Field

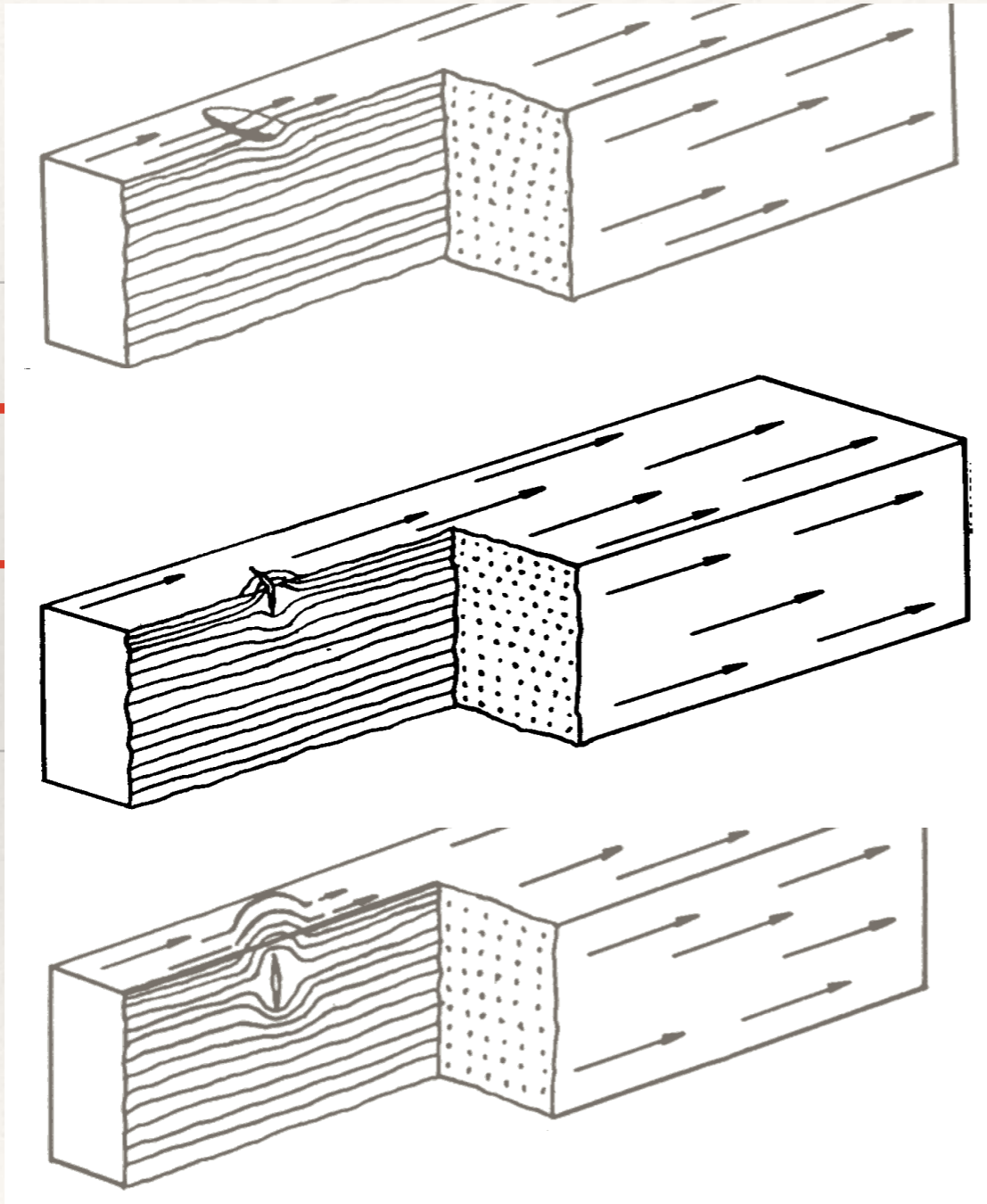


Near Field





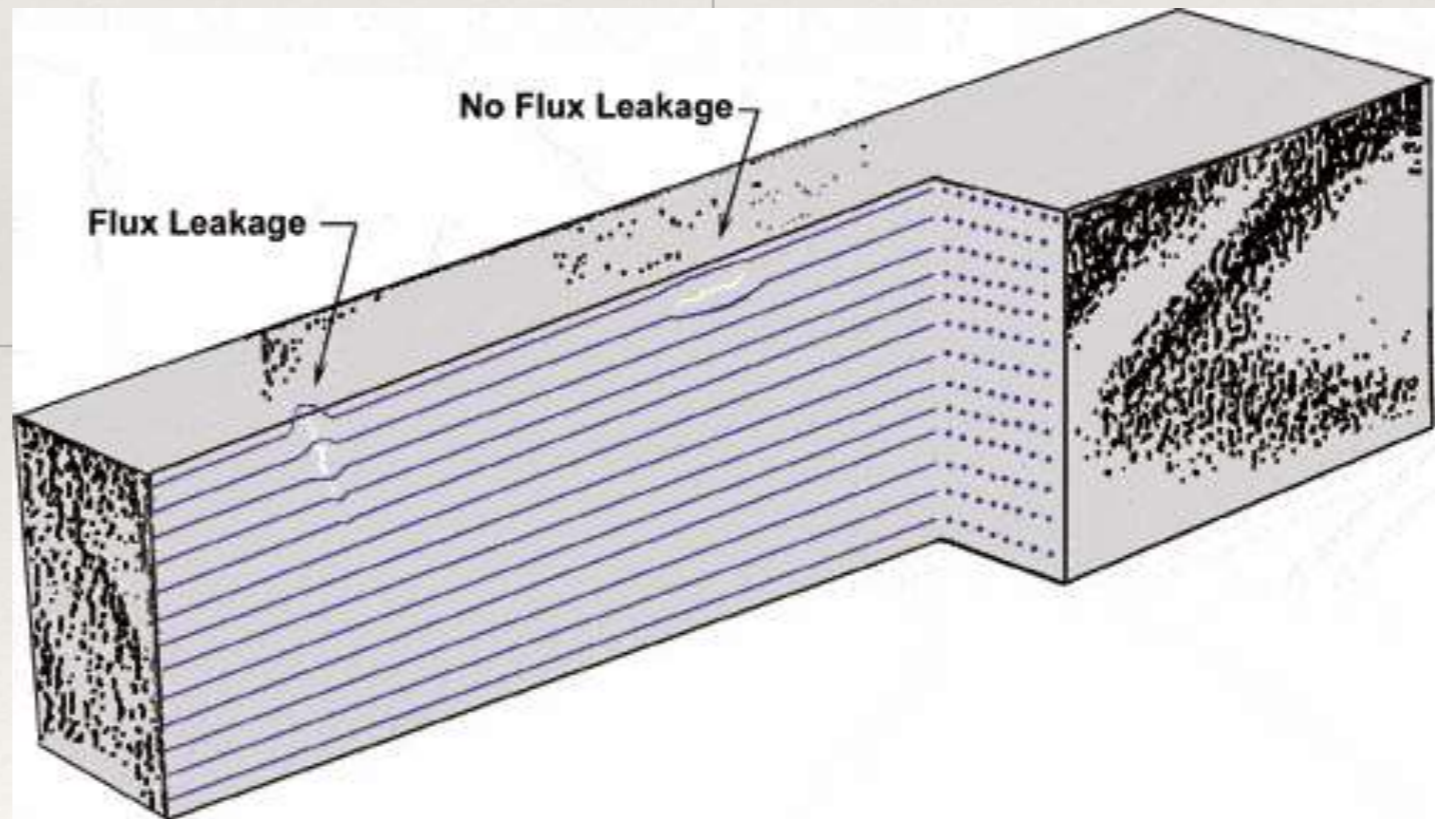
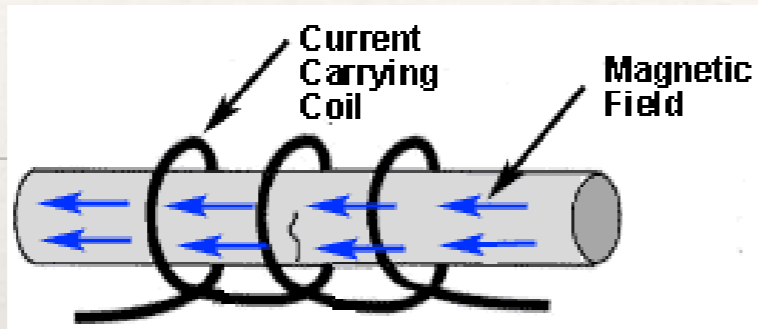
T
par

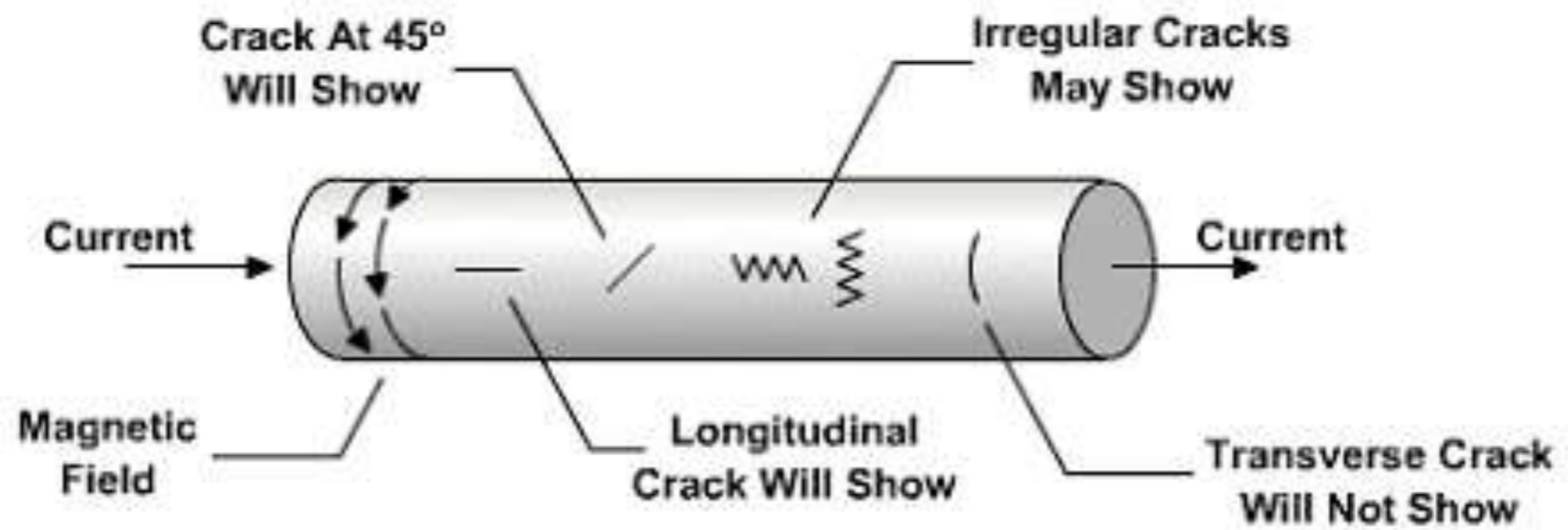


Melladura: Las líneas de fuerza no atraerán partículas

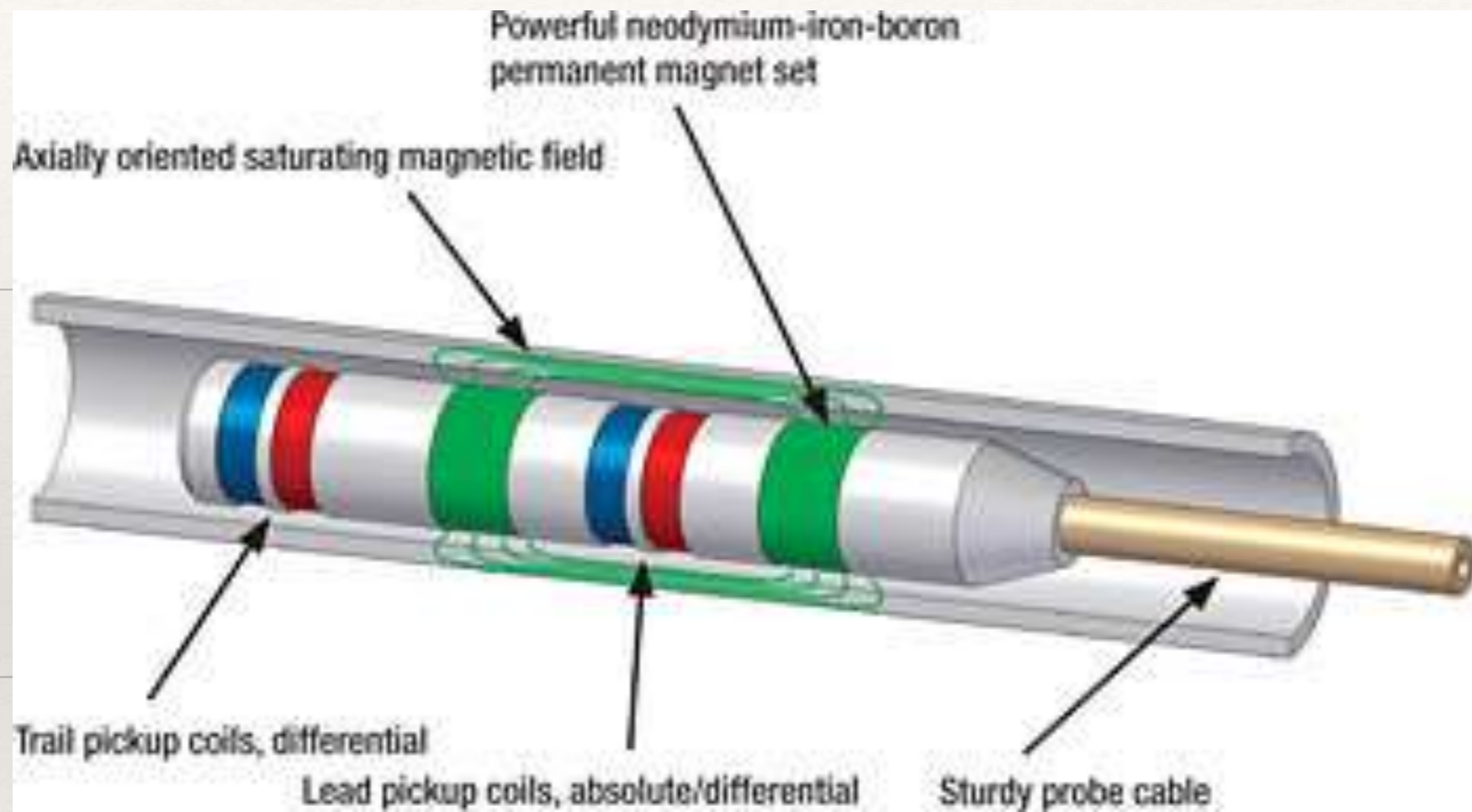
Fisura superficial: La fisura hace que aparezcan polos locales atrayendo a las partículas

- Fisura sub-superficial: Las líneas de fuerza son forzadas a través de la superficie atrayendo a las partículas





MFL

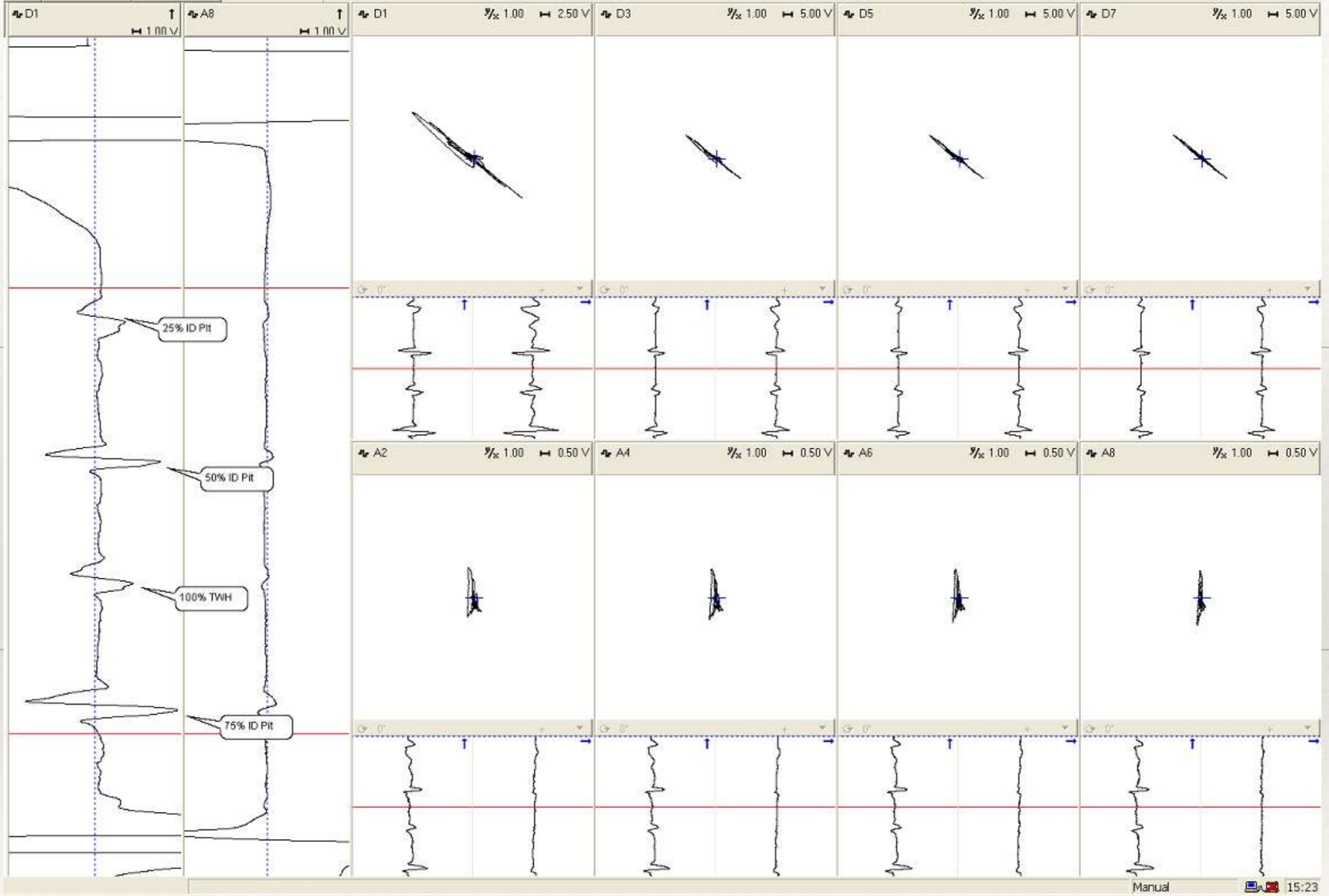


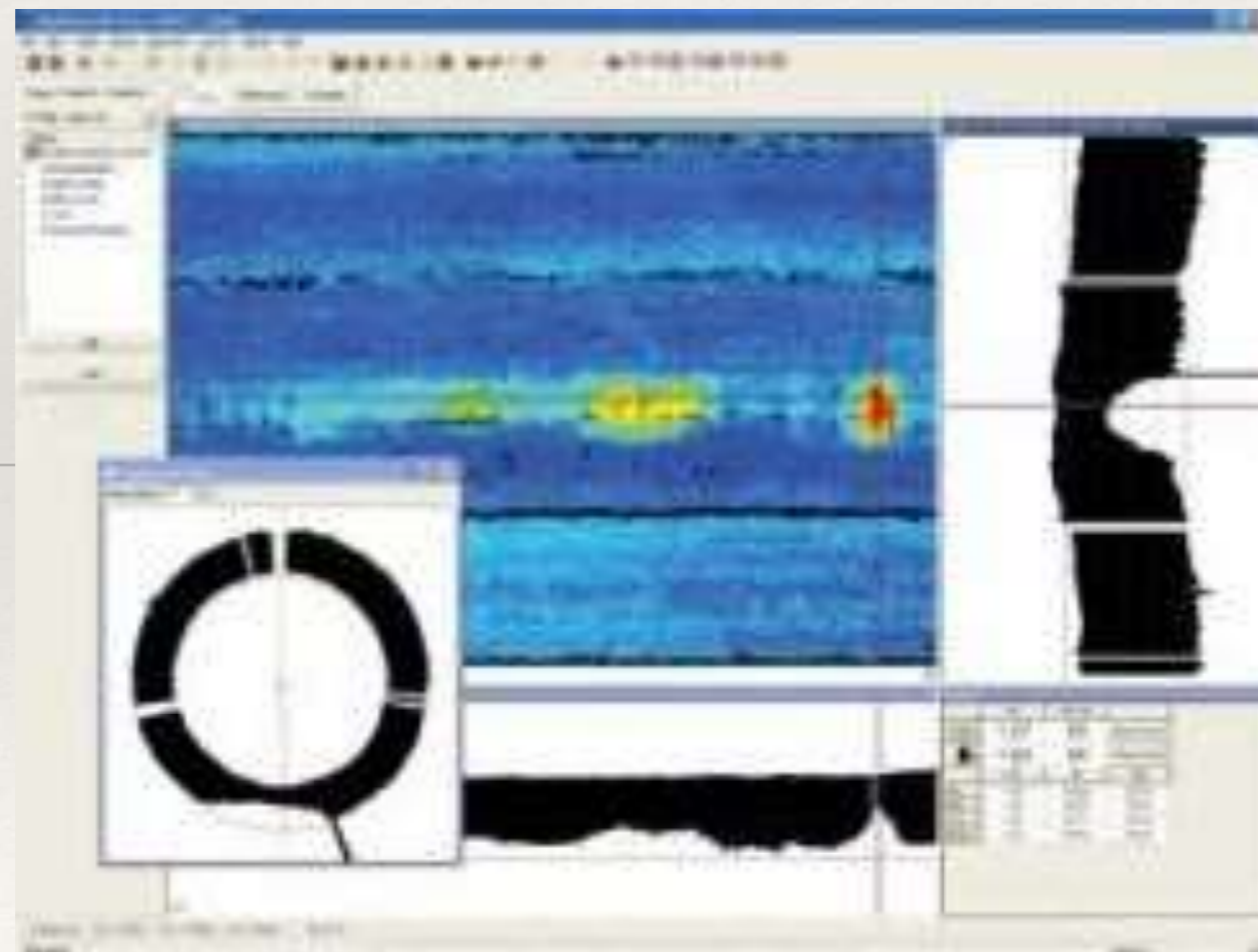
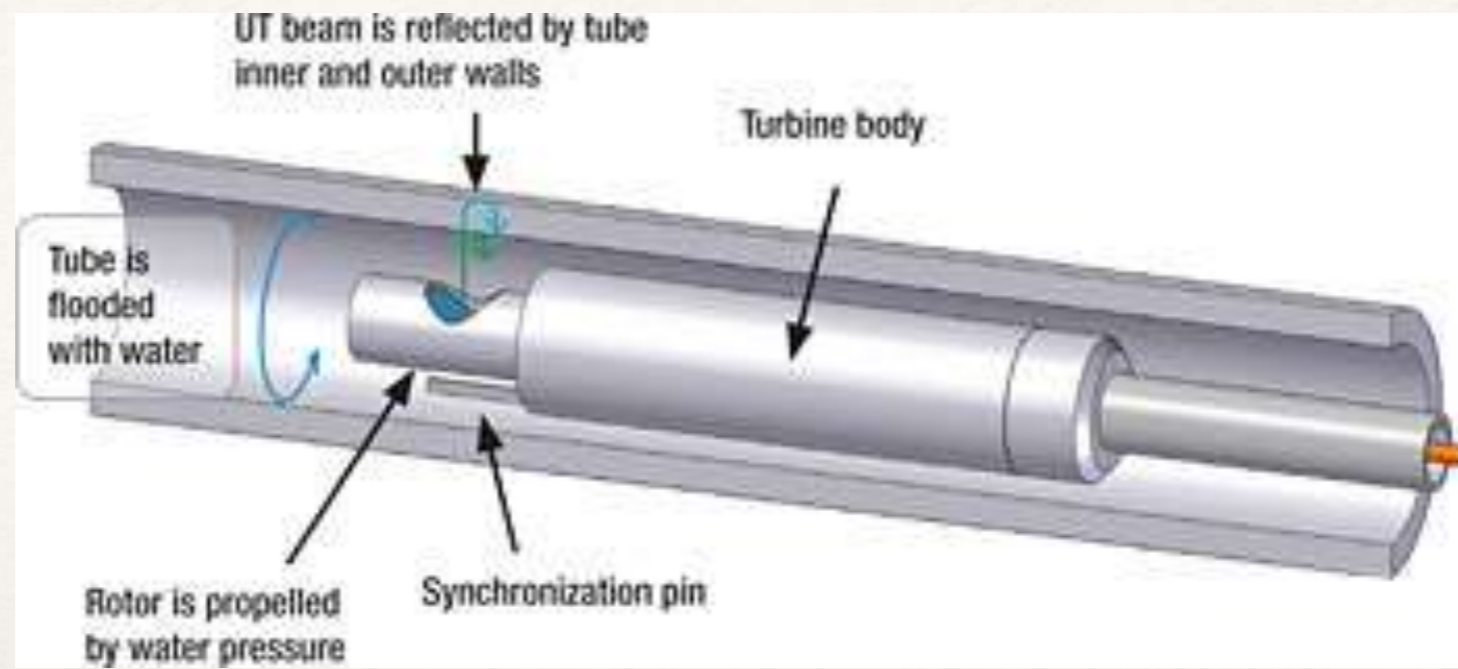
MFL



Prueba de Cables MFL & Weak Magnetic Technology







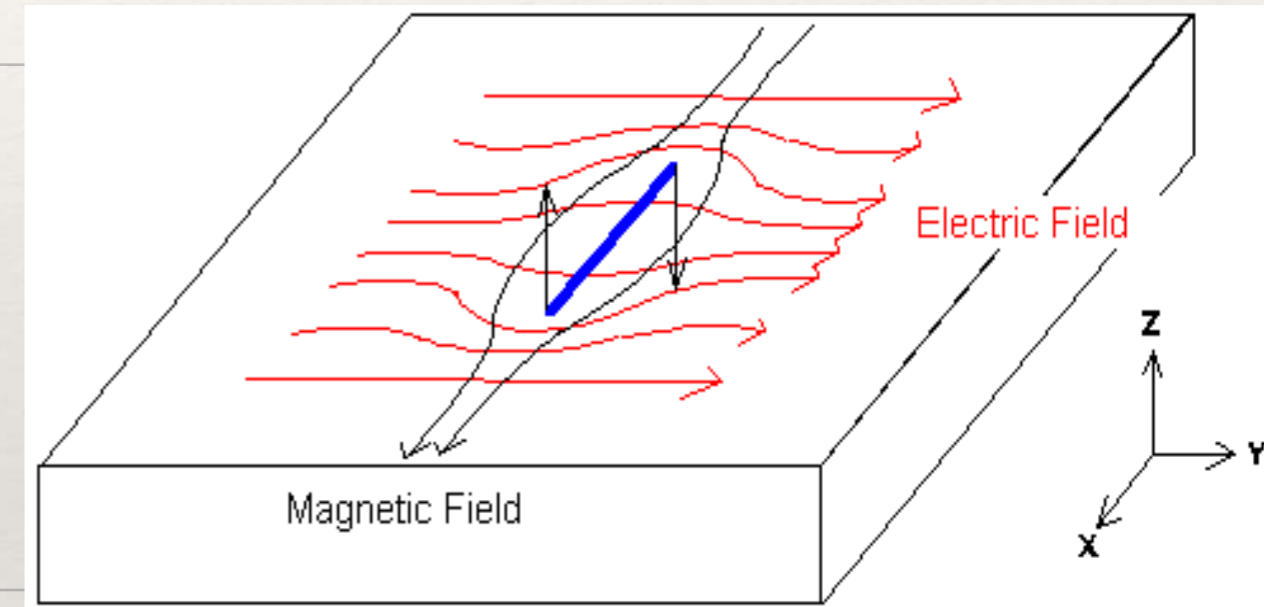
ACFM es una técnica que sensa la *'perturbacion de la corriente'*

Es significativamente diferente a los métodos de ensayo por Corrientes Eddy

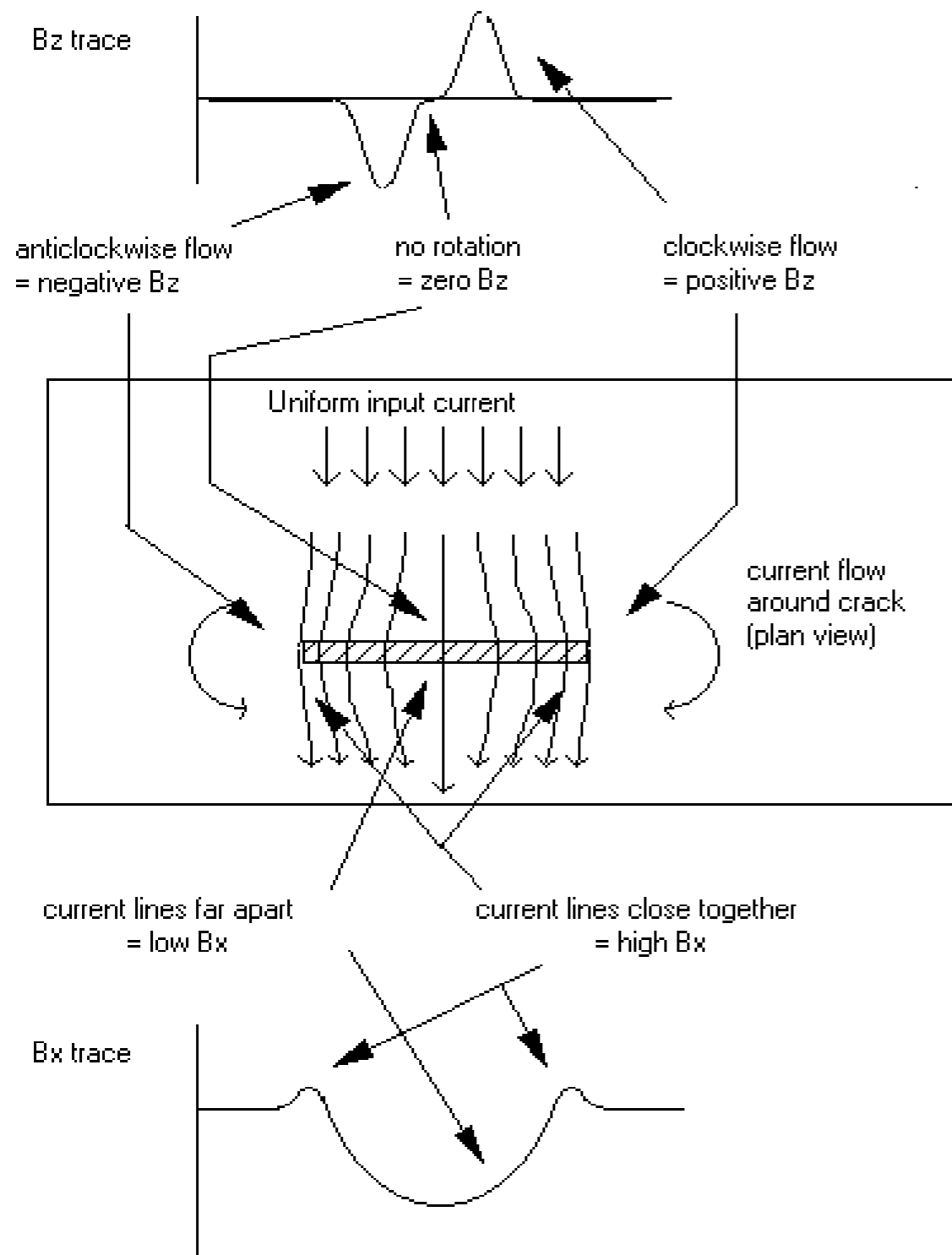
Trabaja realizando mediciones cuantitativas de las perturbaciones del campo magnético el cual se crea cuando una corriente eléctrica es perturbada por la presencia de una fisura que corta la superficie.

- ◆ Cuando una corriente alternante fluye en un conductor lo hace siguiendo en forma de una capa (skin) en la superficie. Si una fisura intercepta la superficie esta capa de corriente uniforme es perturbada. Hay un campo magnético asociado con este campo eléctrico y las perturbaciones del campo magnético (asociados con las perturbaciones del campo eléctrico) pueden ser medidos usando sensores de campo magnético. A pesar que el campo magnético resultante es complejo, se pueden escoger algunos componentes, los cuales se perturban debido a las fisuras para ser identificados y cuantificados.

- ◆ Se ve esquemáticamente como el campo eléctrico es perturbado en la superficie por la presencia de una fisura. En la práctica, dos componentes del campo magnético son medidos, B_x a lo largo de la longitud de la discontinuidad, lo cual responde a cambio de la densidad de corriente en la superficie y da una indicación de la profundidad de la discontinuidad y B_z el cual indica una respuesta negativa o positiva (en el sentido de las agujas del reloj) de un extremo del defecto, causado por corrientes generadas polos y esto da una indicación de la longitud de la discontinuidad..



ACFM READINGS

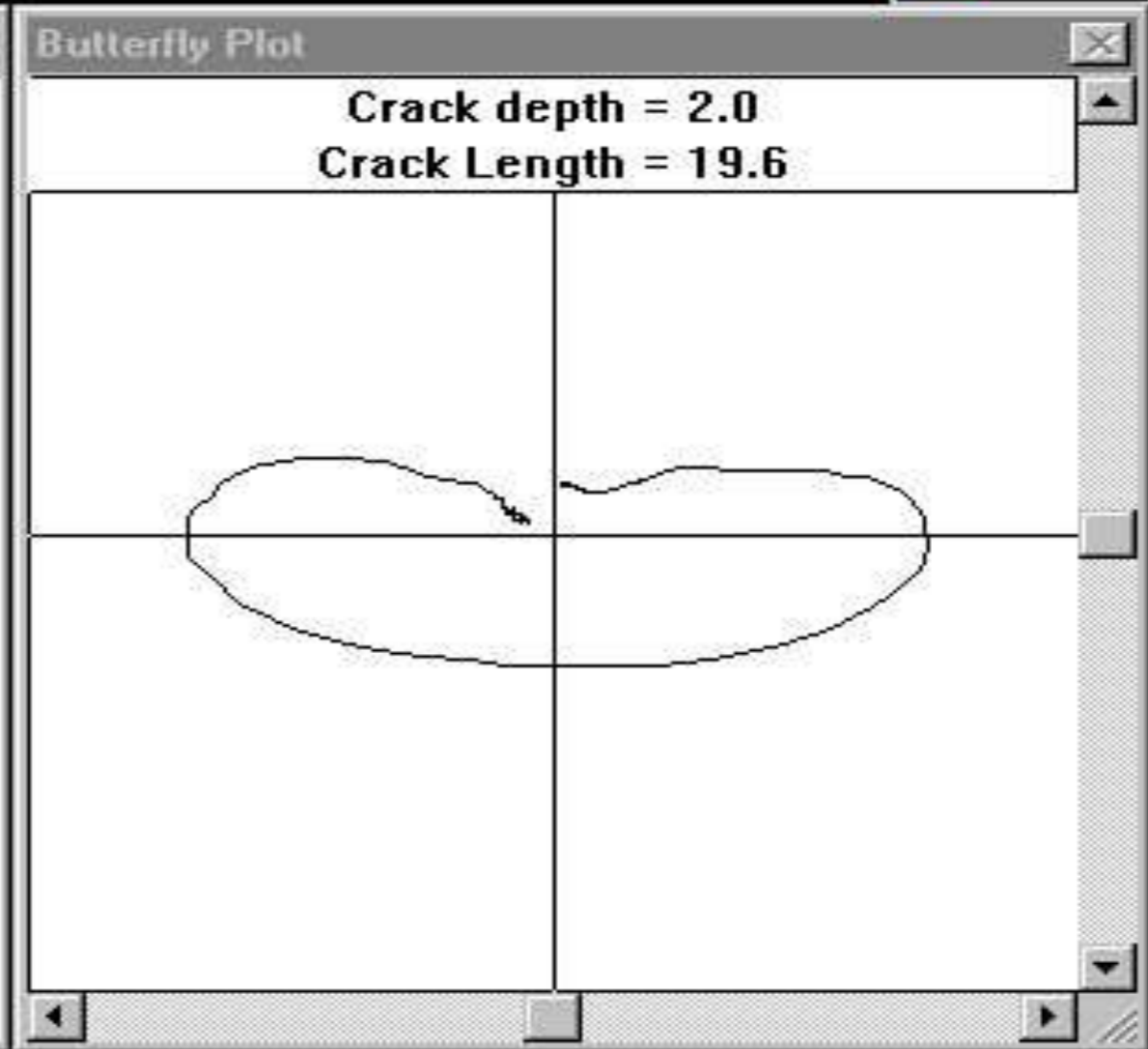
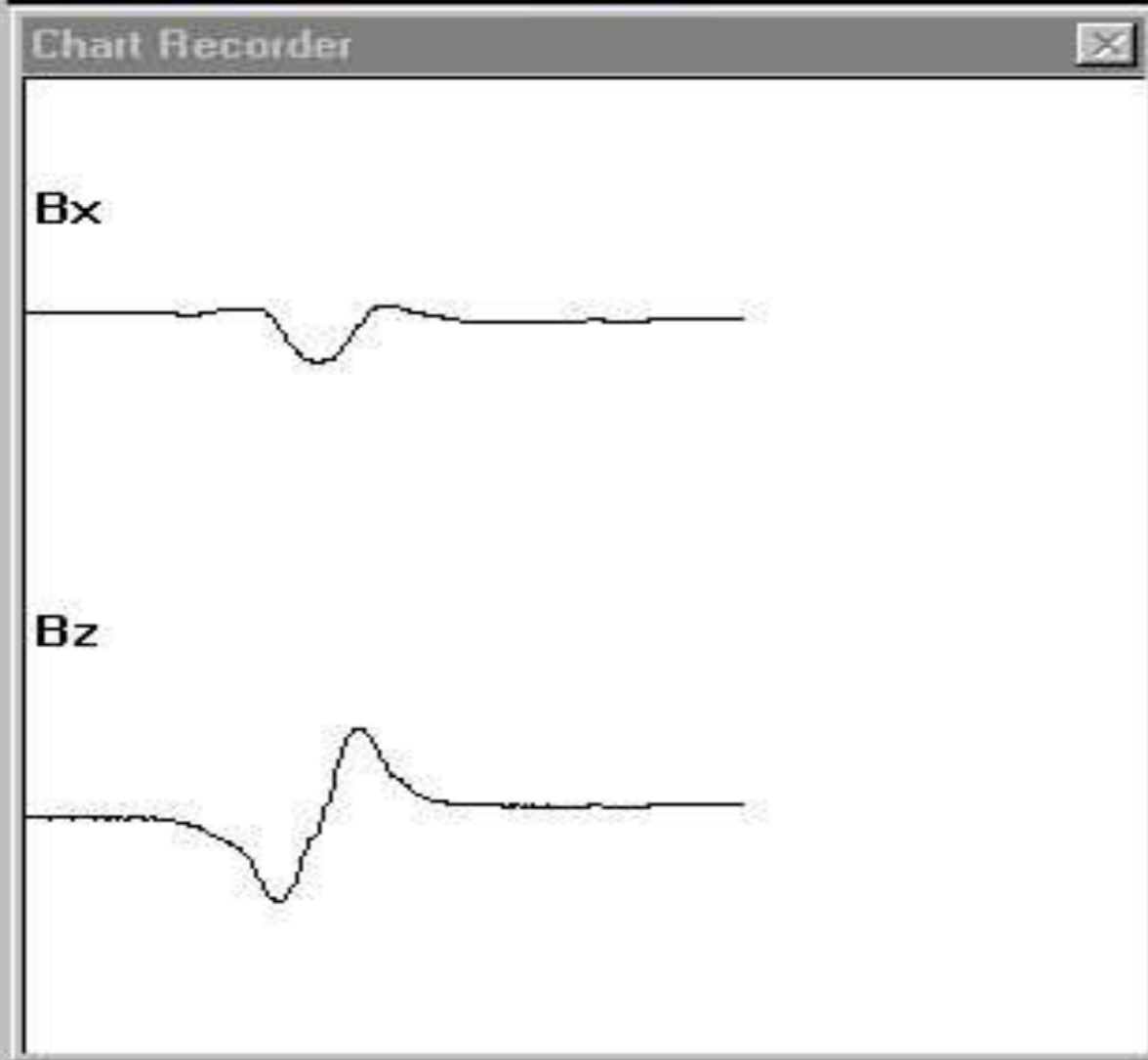


El sensor **Bx** responde a la densidad de corriente y muestra una reducción con la profundidad de la fisura

El sensor **Bz** responde a los extremos de la fisura y muestra un caída/pico cuando el transductor pasa sobre la fisura, e indica la longitud de la fisura.

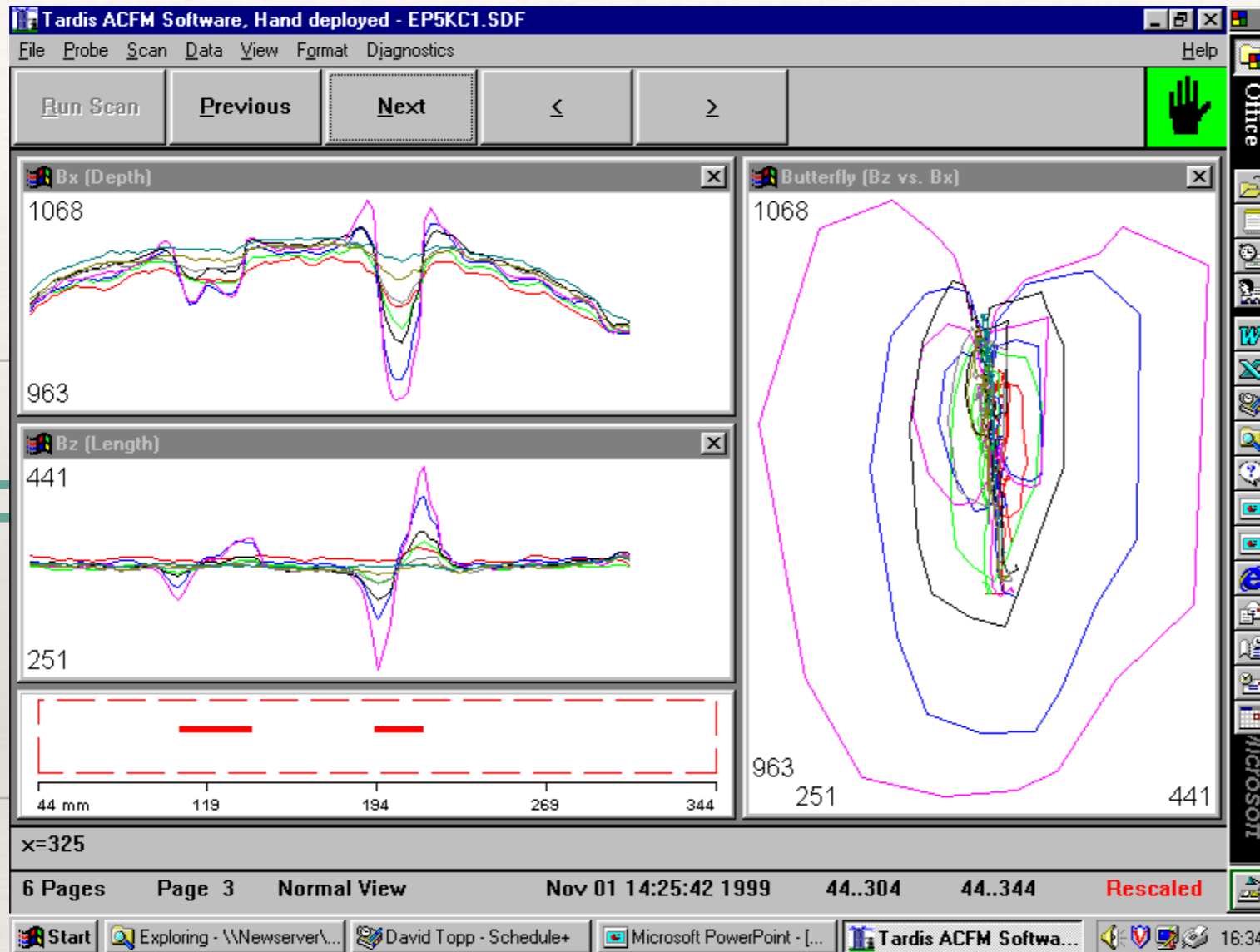
Para ayudar en la interpretación, las lecturas B_x y B_z son ploteadas una contra otra y esta presentación se da acompañando a las graficas de las datas de B_x y B_z , el resultado es un lazo (“loop”) característico formado por la presencia de una discontinuidad. Esta presentación se llama “Mariposa” (butterfly plot), es único para el ACFM, y es insensitivo a la velocidad de inspeccion. Lo quie eleva grandemente la interpretacion

1608 Bx 9 Bz Run Stop Pause Graph Replay



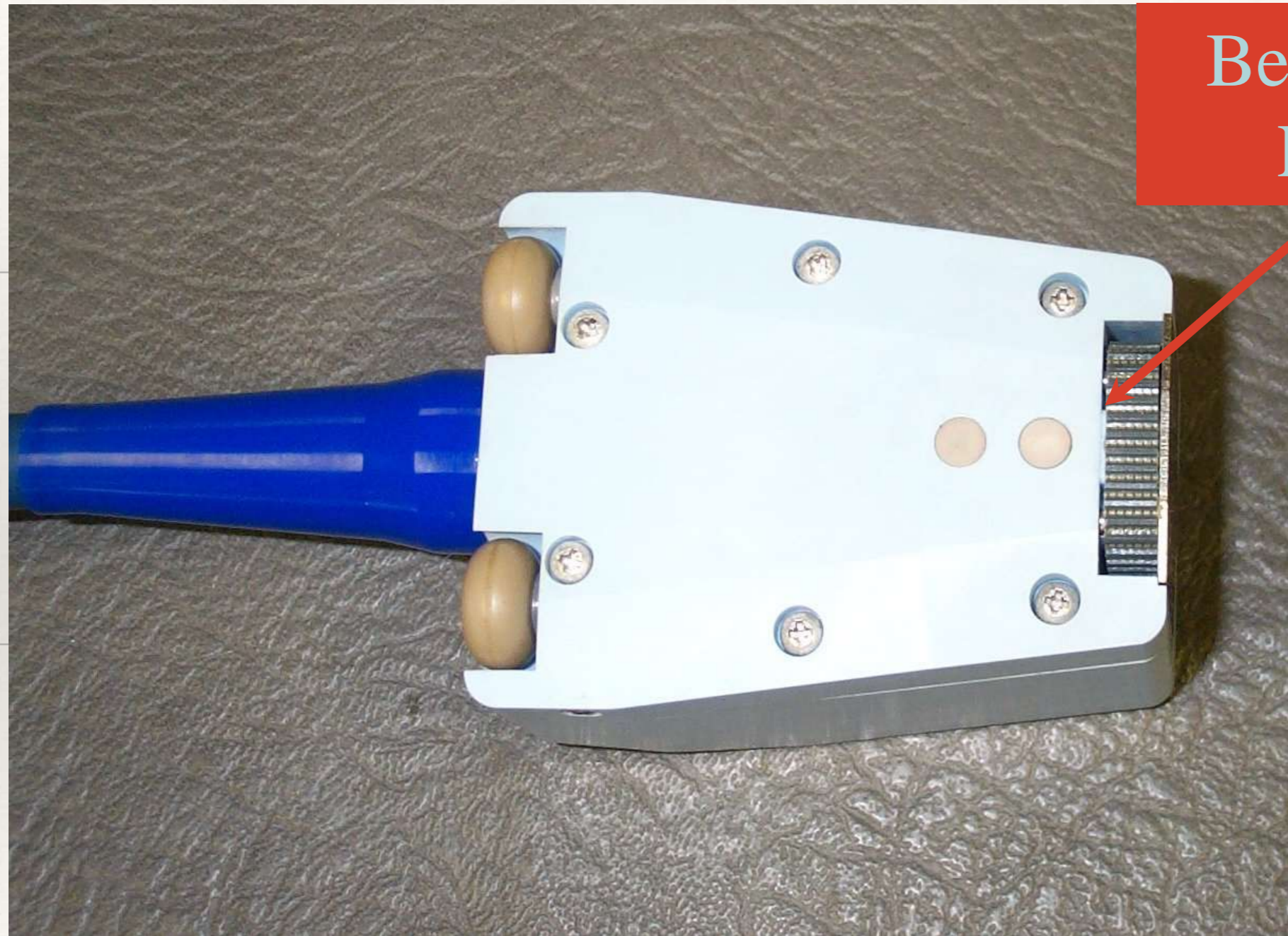
Next Previous First Last Delete Undo

ACFM



Data from an array probe is displayed in the same way as manual ACFM. Each row of sensors is allocated a colour. The Butterfly Plot is retained. 2 cracks are shown.

Encoded Probe

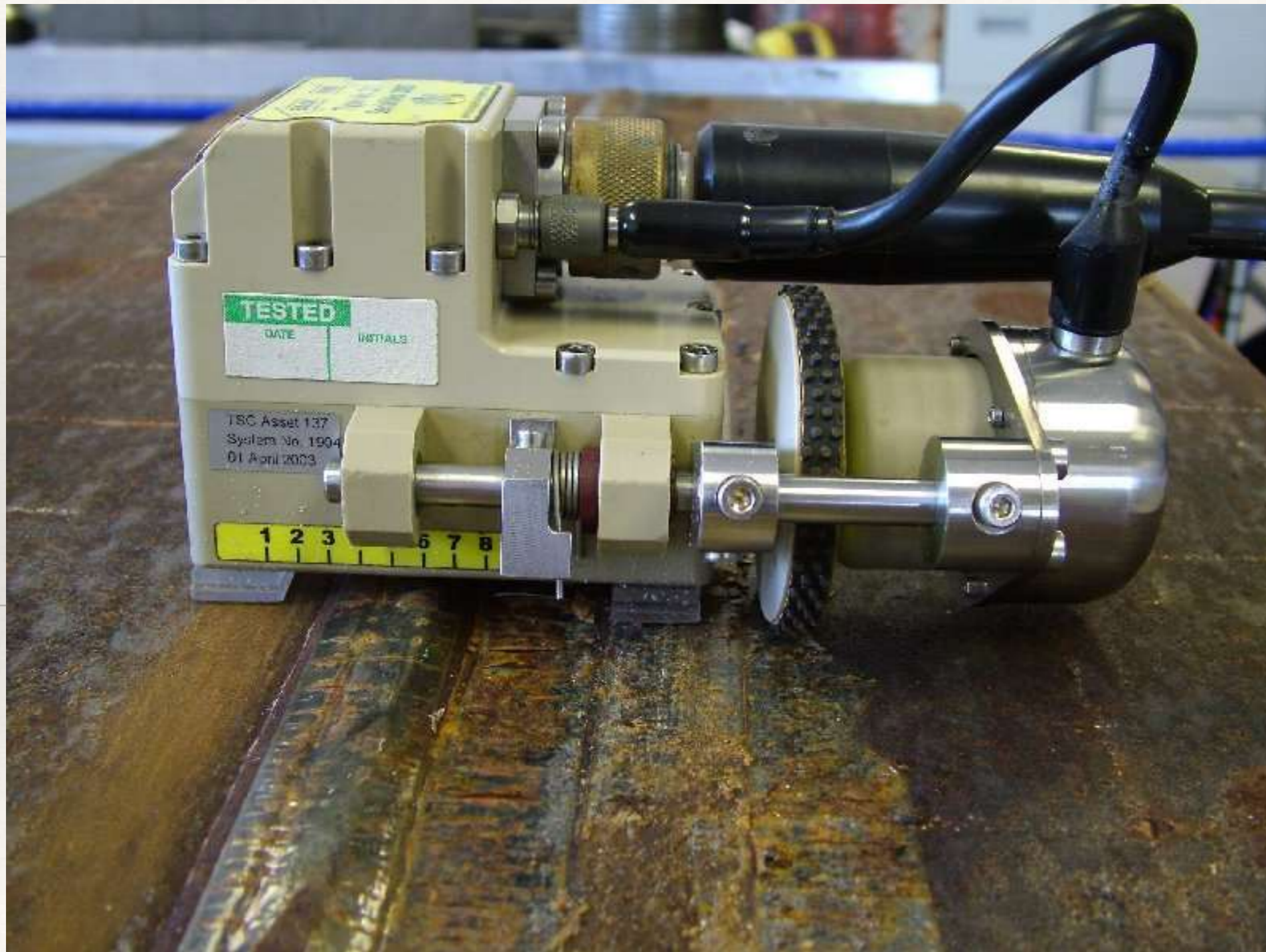


Belt Drive to
Encoder

Compliant array



Pipe seam weld inspection with array probe (underwater probe)



- ◆ ACFM es una tecnología nueva con aplicaciones in-situ interesantes para el monitoreo de cargas y tensiones.
- ◆ Un numero de estudios se han completado satisfactoriamente y están ahora ensayándose para su uso en campo dentro y fuera del agua

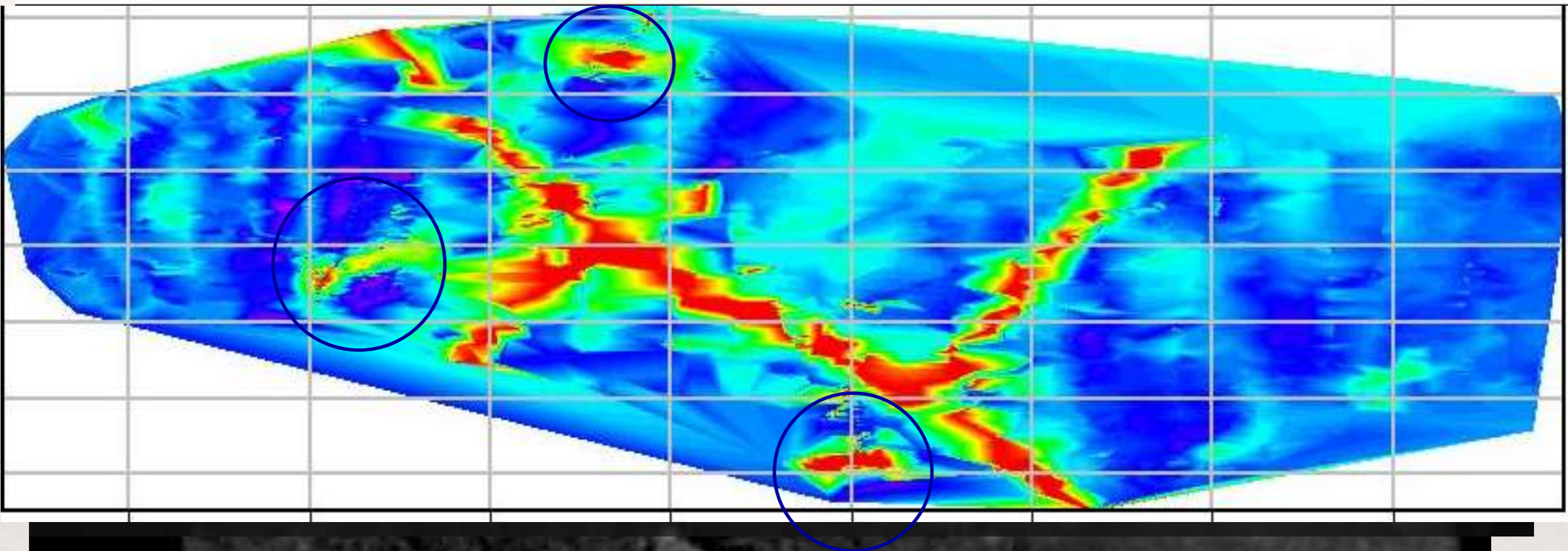
Uso de los Neumáticos Gigantes (Desarrollo de una nueva aplicación)

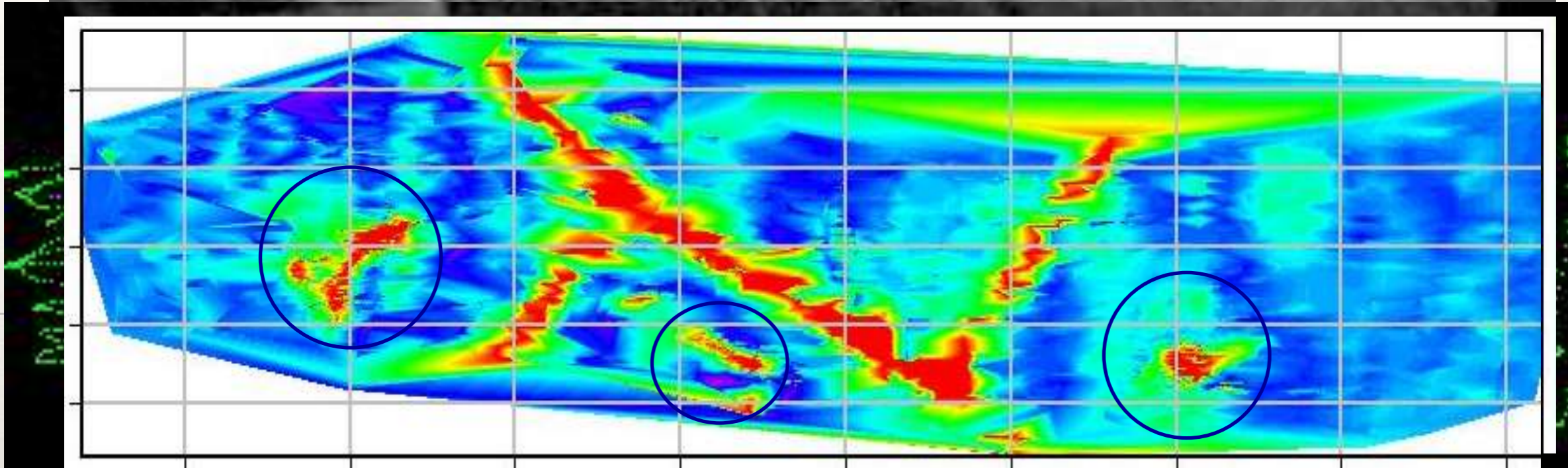


- † Las cadenas protectoras de neumáticos no pueden ser utilizadas en los grandes camiones mineros ya que estos se desplazan grandes distancias por toda la mina. Las cadenas tendrían una vida muy corta si se usaran en los neumáticos de estos camiones mineros.

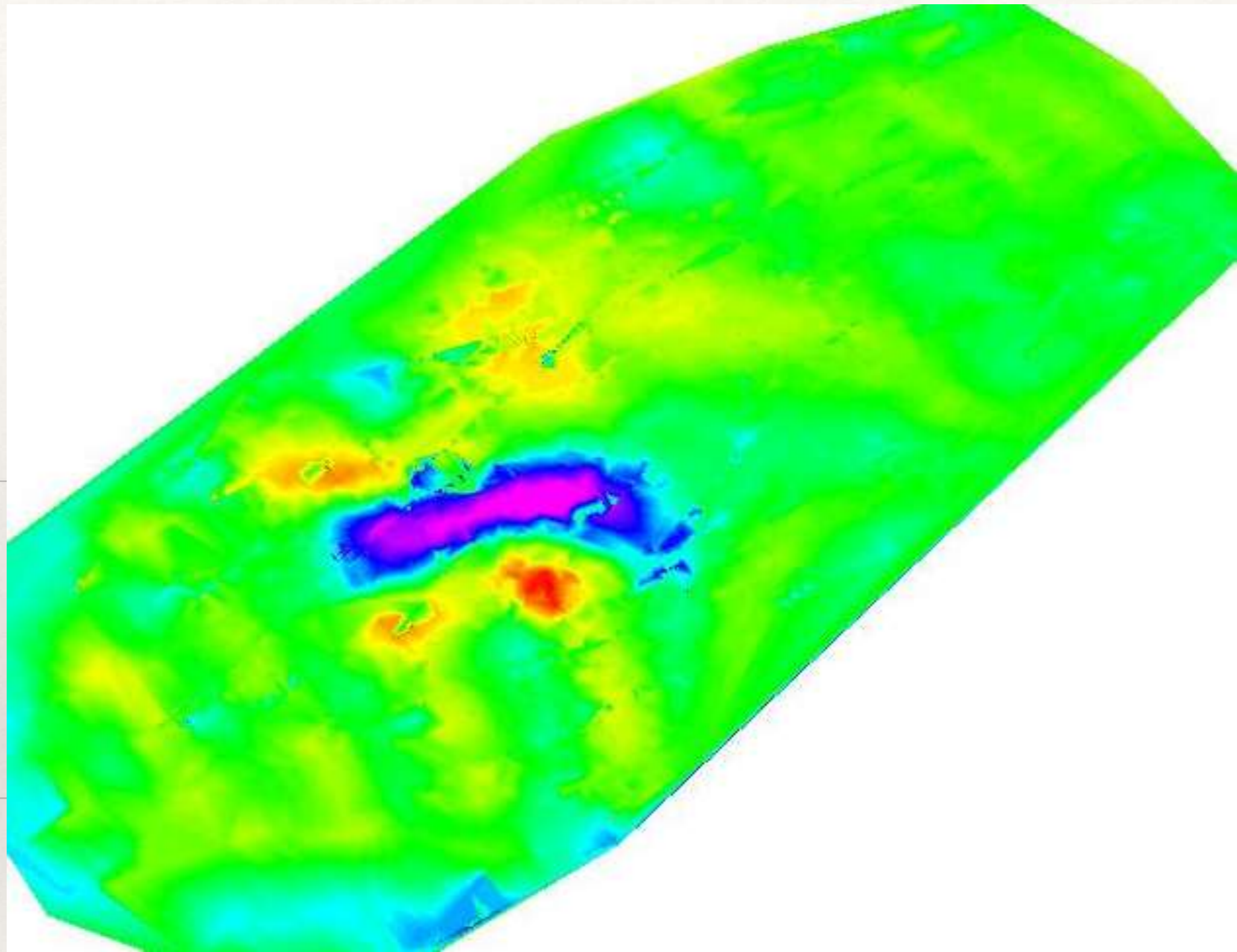
MICROWAVES IN TIRES INSPECTION

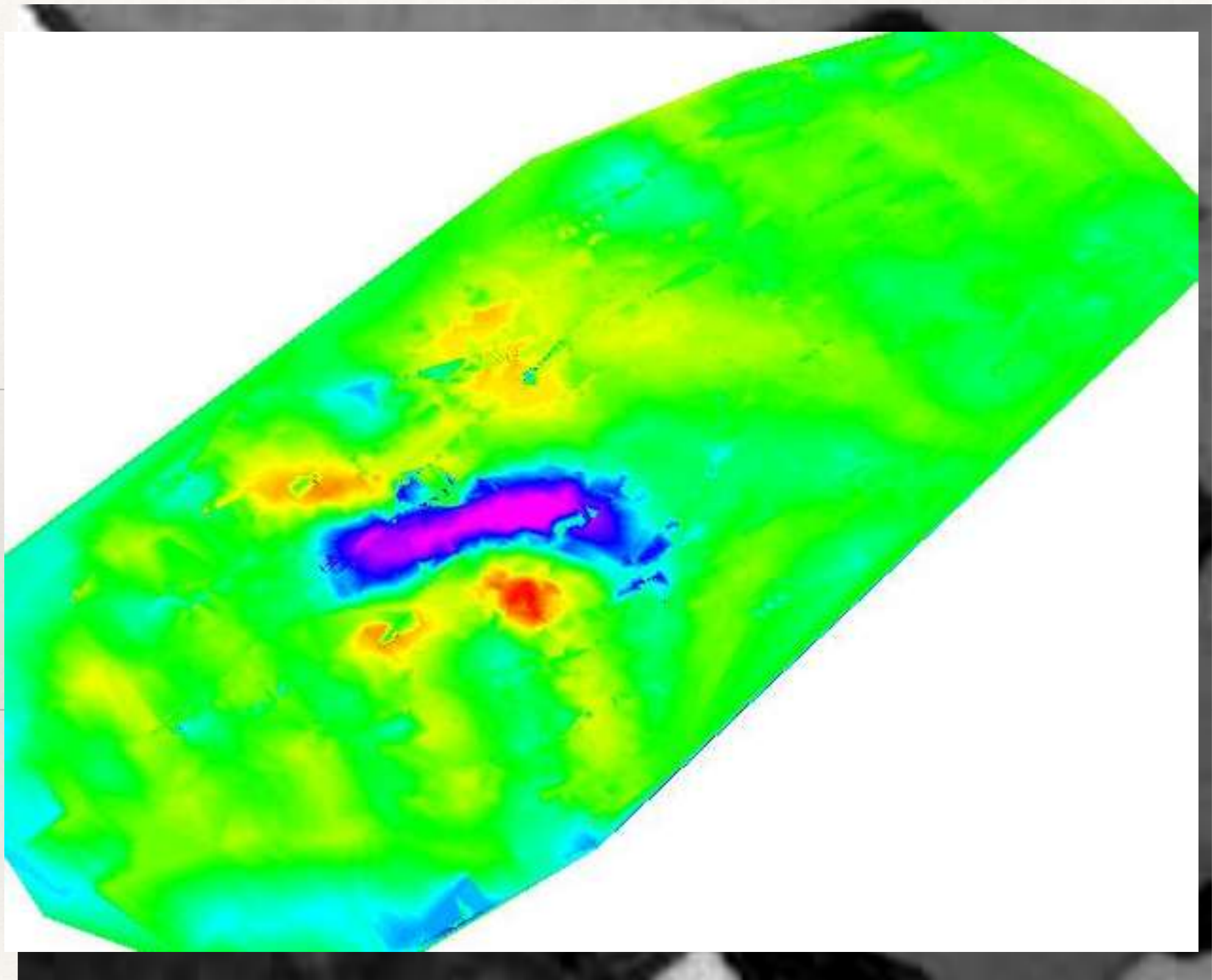




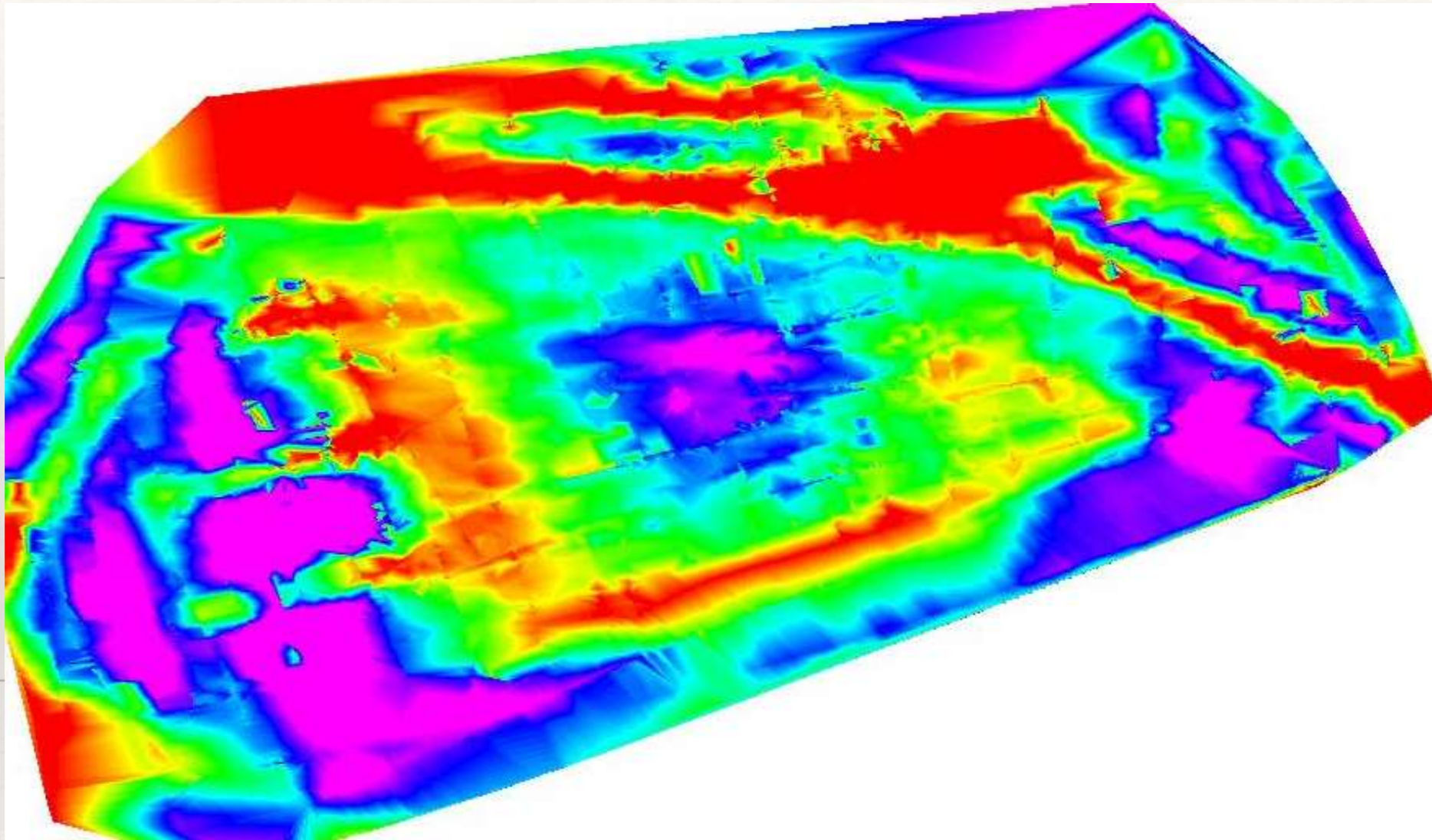


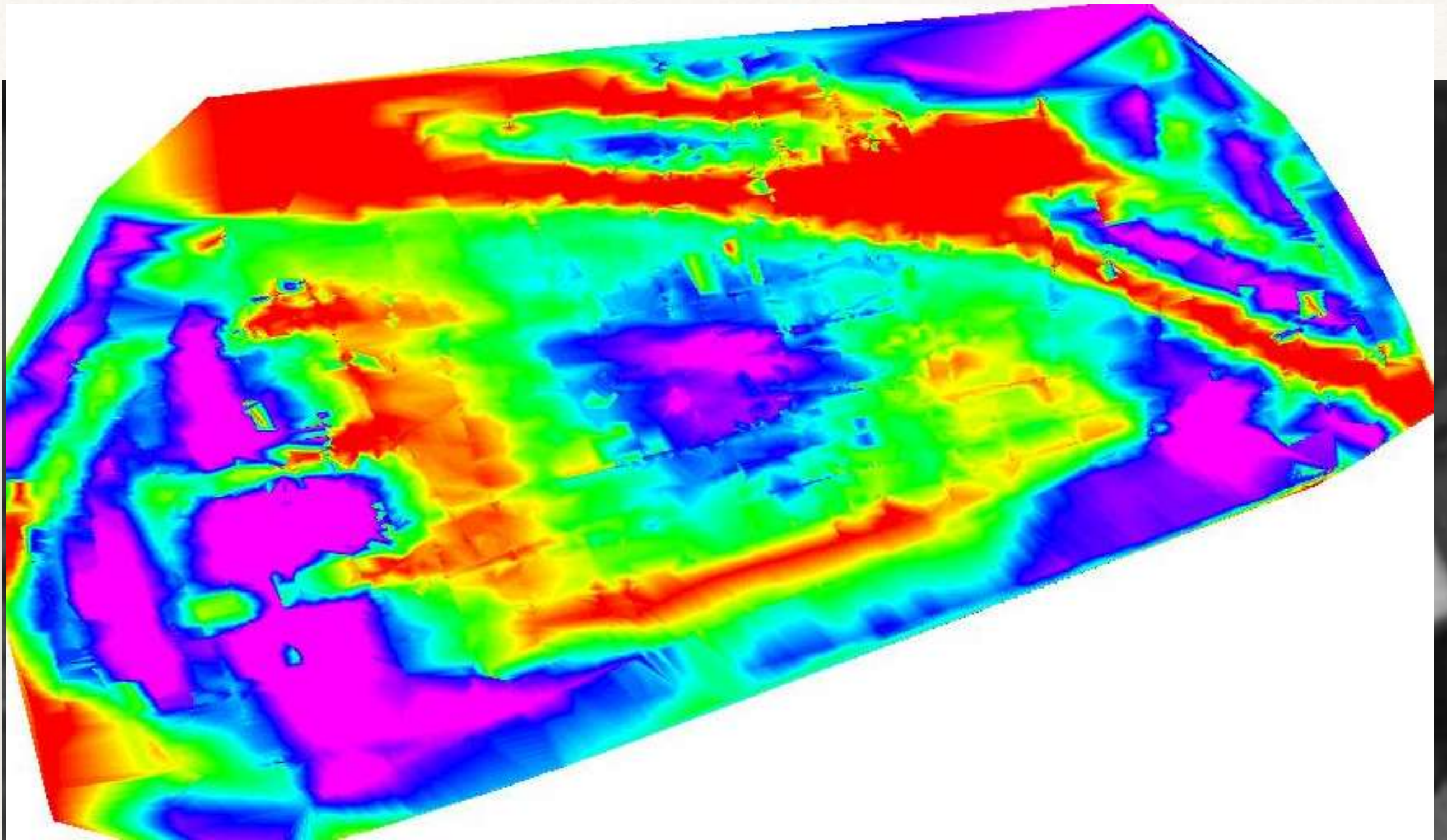






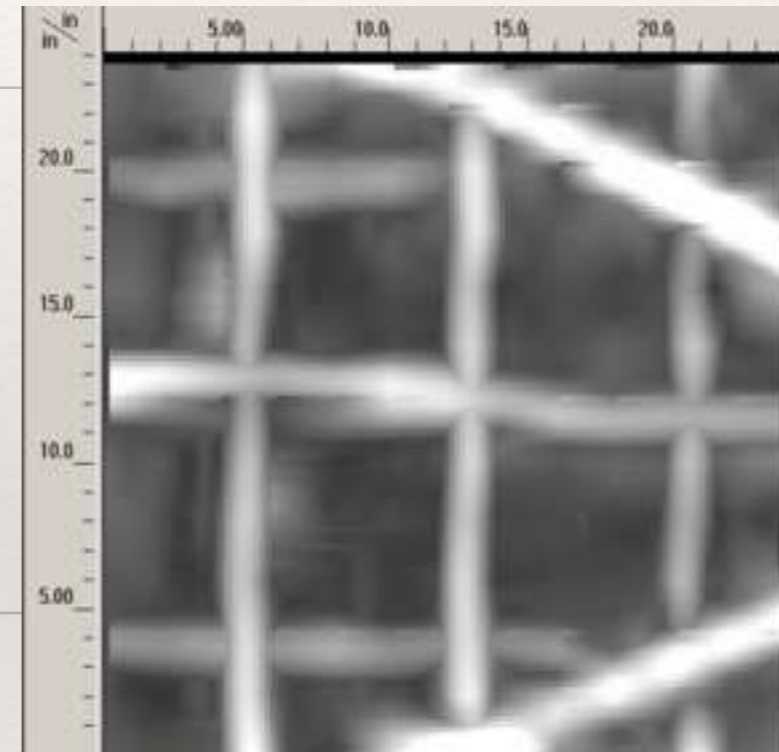






Uso de Radares en Inspección de Neumáticos

(Solución Original)



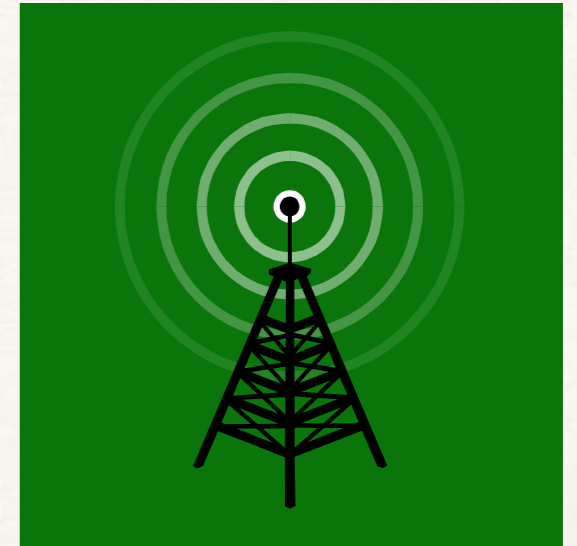
What is GPR?

- GPR stands for Ground Penetrating RADAR.
(**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging).
- High frequency electromagnetic (EM) reflection.

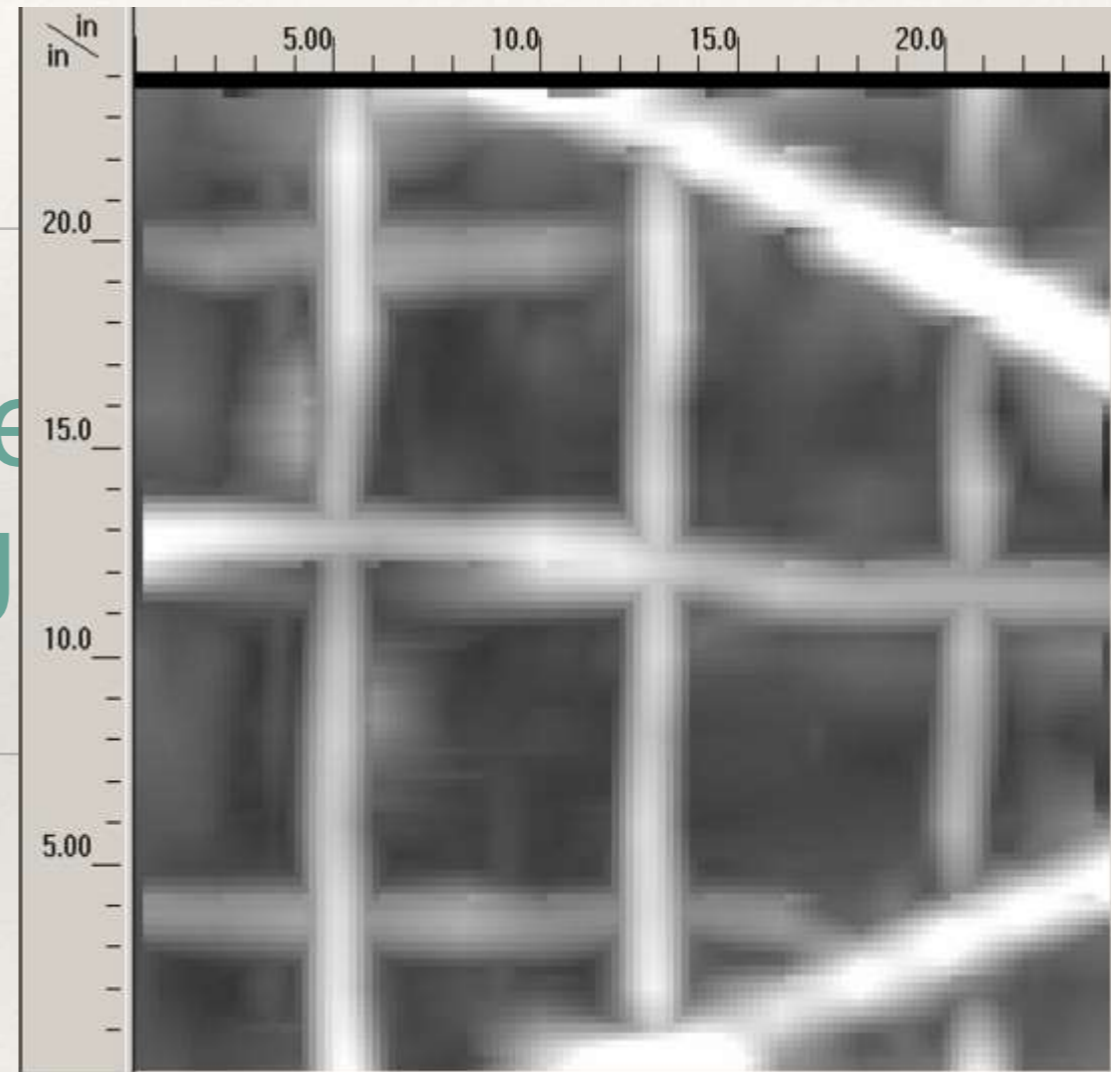
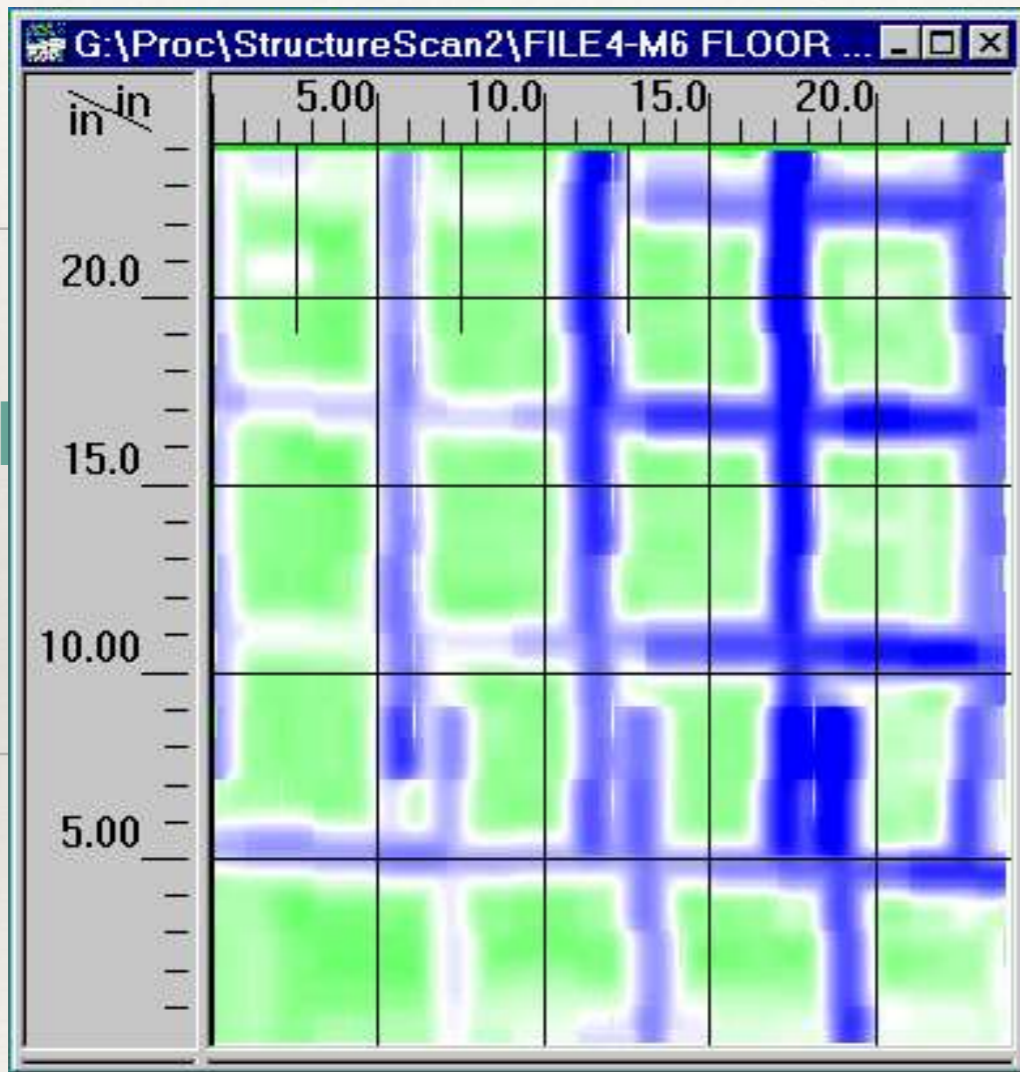
 - At 1.6 GHz it is in the microwave range.
- Very low power emissions, ~ 1% of a cell phone.
- Ultra-wide band (UWB) energy: uses a wide range of *frequencies*.



Frequency



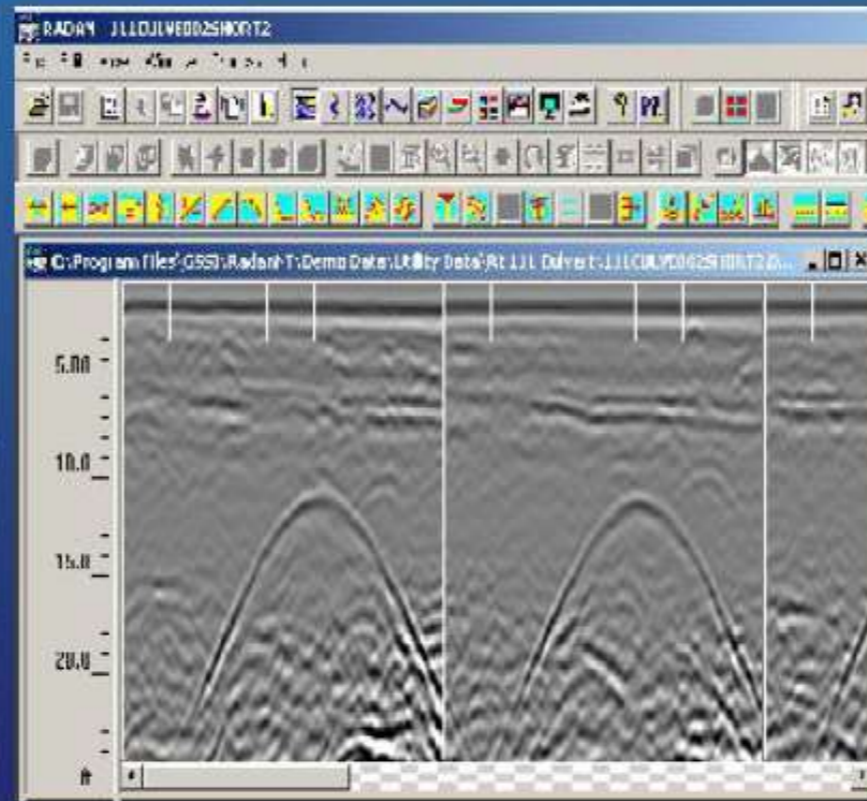
- Frequency = cycles/second.
 - 1 cycle/second = 1 Hz (Hertz)
 - GPR operates in the MHz (Million Hz) or in the GHz (Billion Hz) range.
-
- Lower frequency = Deeper Penetration, BUT coarser resolution.
 - 18" to 30 " in concrete: 1.6 GHz and 900 MHz
 - 8 ft in the ground: 400 MHz (utilities, UST's, Archaeology)
 - 12 ft in the ground: 270 MHz
 - 25 ft in the ground: 200 MHz (shallow geology)
 - 100 ft in the ground: 100 MHz (water table, bedrock)
 - 1000 ft in ice: 16 MHz
-



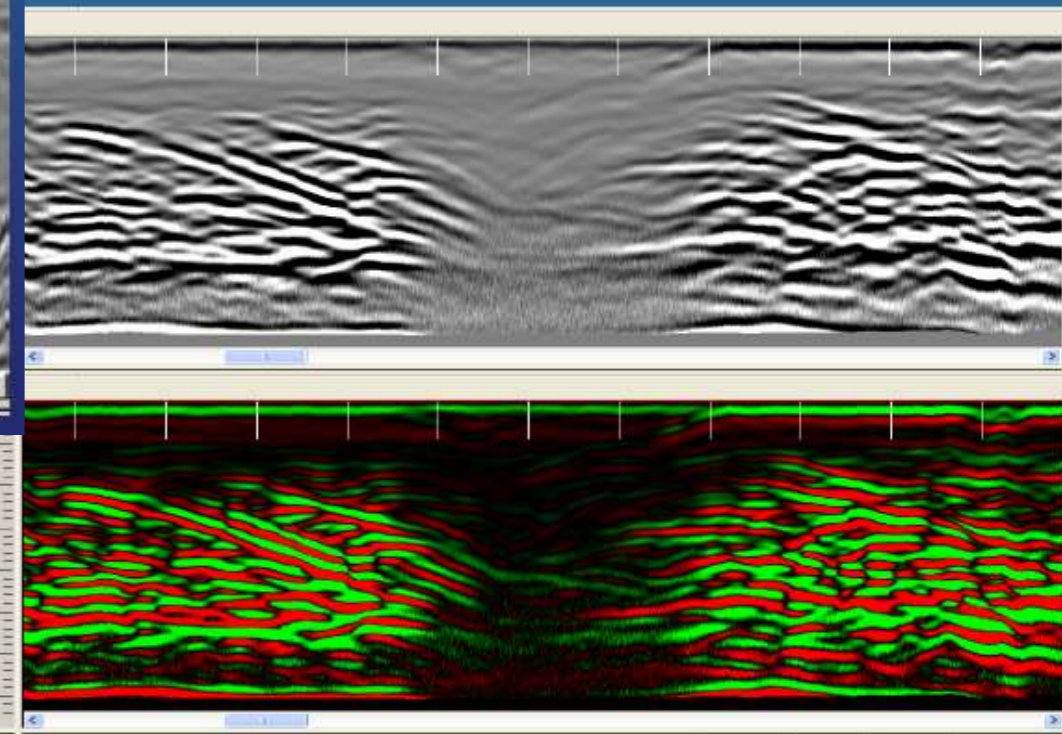
Increasing

GROUND PENETRATING RADAR

2D Data Sample
4' Steel Pipe 10 ft Deep



2D Data
Finding A Broken Pipe

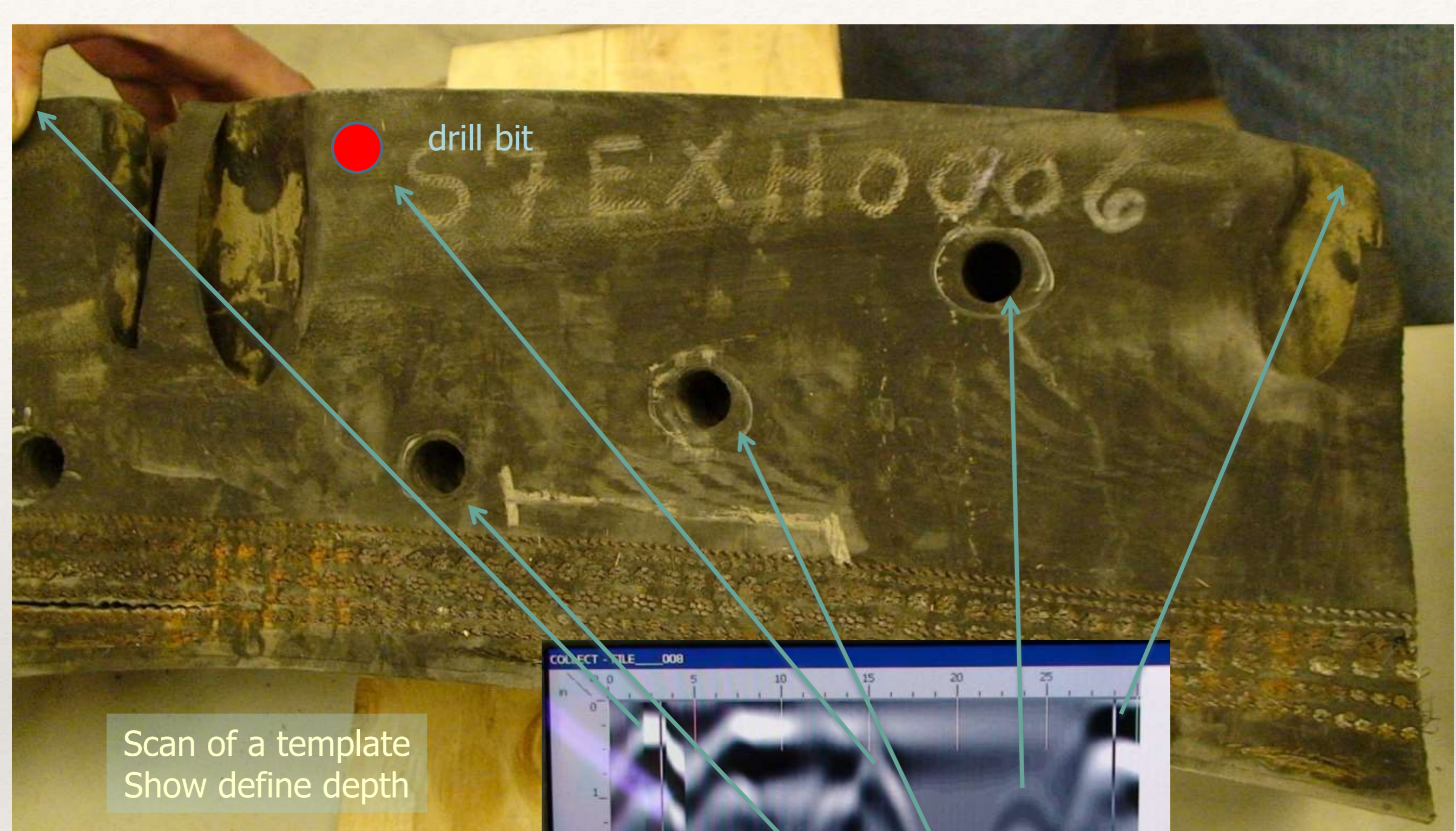


Desarrollo de una nueva tecnología basada en el uso de microondas para detectar rocas dentro de los neumáticos gigantes



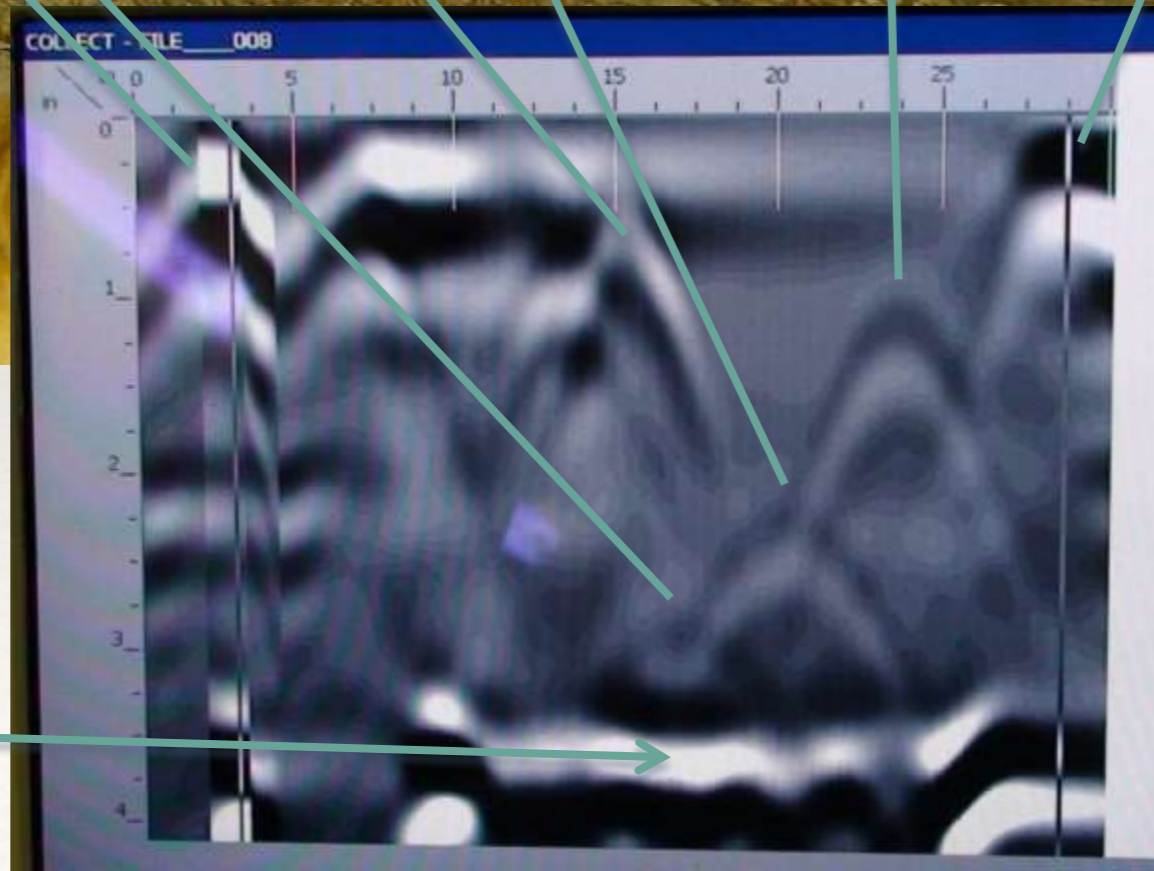
GROUND PENETRATING RADAR



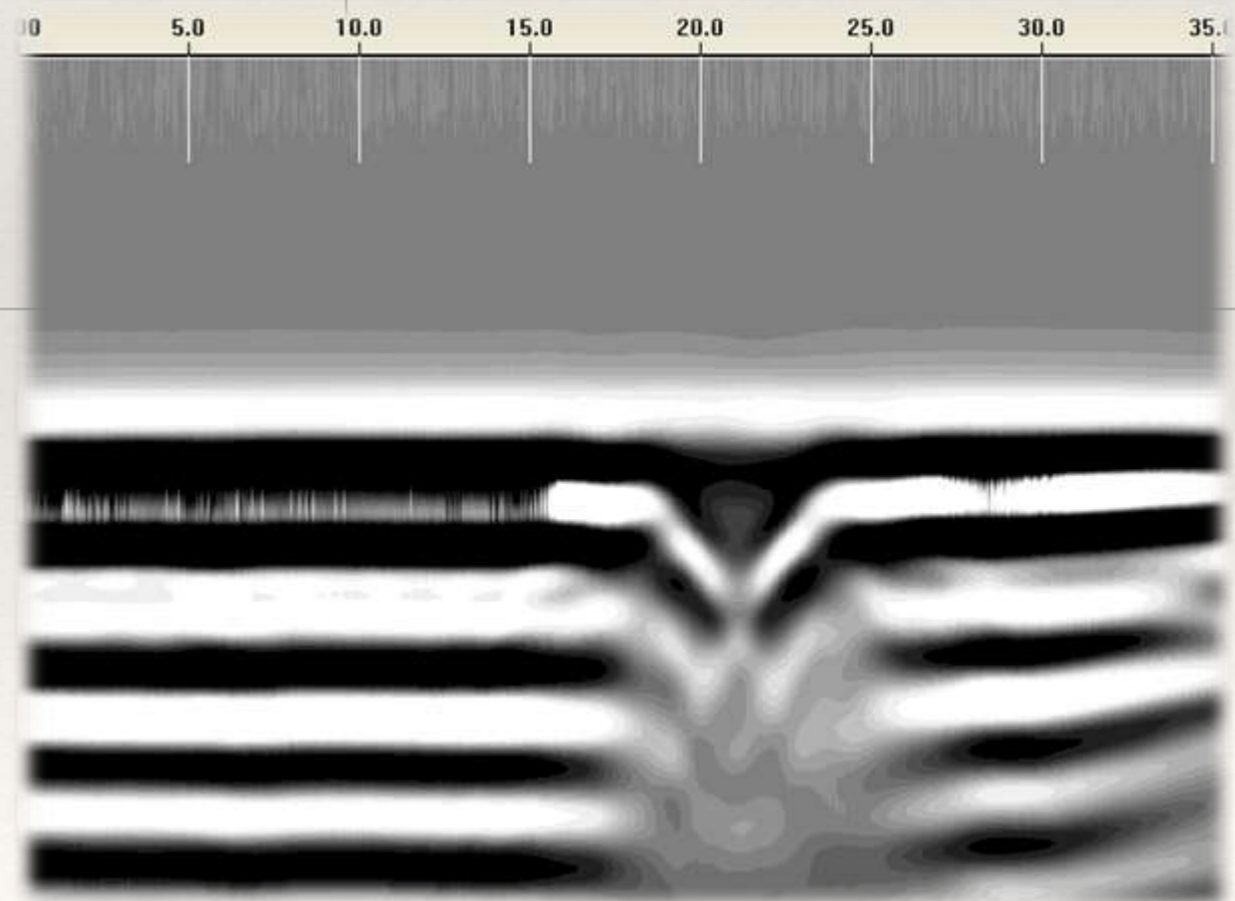
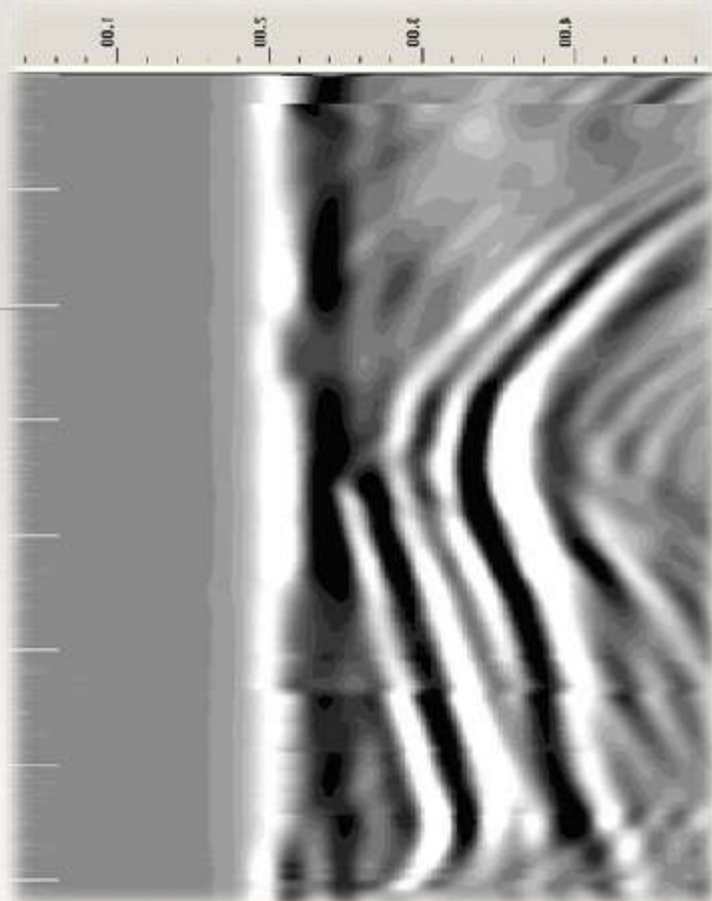


Scan of a template
Show define depth

Core reflection



RADAR



Electromagnetic Testing of HDPE

University of Missouri Science & Technology with NDT Innovations, Inc.

