



Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS, MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS
FENÓMENOS DE CAMPO MAGNÉTICO PARA LA
DETECCIÓN DE DEFECTOS EN DUCTOS
FERROMAGNÉTICOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. ELIAZAR HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

ASESORES:

DRA. NANCY VISAIRO CRUZ

DR. HUGO IVÁN MEDELLÍN CASTILLO

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar el campo magnético H en un ducto ferromagnético empleando el método de flujo magnético. A través de este método se caracteriza el ducto en condiciones nominales y con cuatro tipos de falla: fuga, grieta, corrosión e incrustaciones.

Para el análisis del fenómeno magnético en el ducto se utiliza un imán en condiciones estáticas, el cual genera un campo magnético en el ducto y se distribuye a lo largo de toda la cavidad interna. La caracterización y el comportamiento del campo magnético en el ducto son analizados por medio de histogramas donde se muestra la distorsión que provoca la falla en el campo magnético y de esta forma se define la presencia y el tipo de defecto. Realizado a través del Método del Elemento Finito y con la ayuda de un software de simulación que permite analizar el campo magnético en el ducto.

Del análisis realizado a distintas posiciones axiales y radiales se obtuvo una posición axial en donde se puede observar una mejor variación del campo magnético para llevar a cabo el sensado y distinguir el tipo de falla que se está presentando en el ducto. Las conclusiones de este trabajo es que a través del Método de Fuga de Flujo Magnético es factible detectar las fallas en el ducto ya que es sensible el campo magnético a las variaciones geométricas que pudiese presentar el ducto a inspeccionar.

Dedicatoria

Primeramente a Dios por permitirme culminar este trabajo.

A mis padres por apoyarme en todo momento.

*A mis hermanos Sebastián y Sergio que estuvieron siempre conmigo
y me alentaban en continuar y finalizar este proyecto.*

Agradecimientos

A mis asesores: La Dra. Nancy Visairo Cruz y al Dr. Hugo Iván Medellín Castillo que con sus conocimientos y experiencias me guiaron en el desarrollo y culminación de este trabajo de tesis.

Al Dr. Raúl Balderas por sus asesorías, aportaciones y recomendaciones en este trabajo.

A mis compañeros de Generación: Alejandro Aganza Torres, Jorge Isaac González Torres, Christian Noé Huerta Saucedo, Roberto Moreno Sánchez, Miguel Ángel Parga Montoya, José Ángel Pecina Sánchez, Gabriela Rangel Ramírez, José Heriberto Rodríguez Estrada y Lina Nohemí Rojas García, por el compañerismo y el trabajo en equipo que desarrollamos durante nuestra formación.

A mis compañeros del IICO: Abril Armenta Franco, Isidro Palacios Camacho e Israel Atzin Rosales Gallegos, por la amistad brindada.

A la beca CONACYT 2008-2010, que me ayudó a financiar mi formación académica durante el estudio de la maestría.

Al proyecto SEP-CONACYT 84616 por el apoyo otorgado.

Índice General

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
NOMENCLATURAS	IX
INTRODUCCIÓN	1

Capítulo 1

ANTECEDENTES TEÓRICOS	5
1.1 Inspección en Ductos	7
1.2 Métodos de Inspección en Ductos.....	8
1.2.1 Inspección Directa	8
1.2.1.1 Inspección Visual.....	8
1.2.1.2 Líquidos Penetrantes	8
1.2.1.3 Magnético.....	9
1.2.1.4 Ultrasonido	9
1.2.1.5 Corrientes de Eddy	10
1.2.1.6 Rayos X.....	10
1.2.2 Inspección Indirecta	10
1.2.2.1 Fuga de Flujo Magnético (MFL).....	11
1.2.2.2 Ultrasonido.....	13
1.2.2.3 Inspección Óptica.....	15
1.2.2.4 Físico (Calibrador)	15
1.3 Antecedentes de la Inspección por Flujo Magnético.....	15
1.3.1 Pruebas en Tuberías de Acero Usando el Método de Fuga de Flujo Magnético.....	16
1.3.2 Sensores Innovadores Electromagnéticos para el Rastreo de Tuberías.....	18
1.4 Discusión del Estado del Arte del Flujo Magnético	22

Capítulo 2

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN DUCTOS FERROMAGNÉTICOS.....	23
2.1 Generalidades del Campo Magnético en Materiales	25
2.1.1 El Magnetismo en los Materiales.....	25
2.1.2 Definición de Cavidad en Campos Magnéticos Vectoriales	26
2.1.3 Leyes Fundamentales del Campo Magnetostático en un Medio-Material	27
2.1.4 Campo Magnético y Potencial Magnetostática Dentro de un Medio Material	29
2.1.5 Condiciones de Frontera para Campos Magnéticos en una Interface entre Dos Medios.	30
2.1.6 Método Especial para la Solución de Problemas Magnetostáticos que Involucran un Medio con μ Constante	32
2.1.7 Magnetización y Cargas Magnetizadas.....	33

2.1.8	Corrientes Magnéticas	38
2.2	Análisis del Campo Magnético en Ductos	41
2.2.1	Aproximación por Líneas de Transmisión.....	41
2.2.2	Análisis del Ducto Como Transformador	45

Capítulo 3

ANÁLISIS NUMÉRICO (MEF) DE LA DISTRIBUCIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO EN DUCTOS FERROMAGNÉTICOS.....		53
3.1	Generalidades del MEF	55
3.2	Modelo MEF	57
3.2.1	Clasificación de las Formulaciones para la Resolución de Problemas Electromagnéticos	59
3.2.2	Método Basado en Potenciales Escalares y/o Vectoriales	61
3.3	Modelo 3D de la Tubería	68
3.4	Análisis de Sensibilidad	70
3.5	Análisis de Flujo Magnético en el MEF.....	72
3.6	Análisis de Fallas en el MEF.....	72
3.6.1	Grietas.....	73
3.6.2	Fugas.....	74
3.6.3	Incrustaciones	75
3.6.4	Corrosión	75

Capítulo 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		77
4.1	Resultados del Campo Magnético en Condiciones Nominales	79
4.2	Condiciones Normales	84
4.3	Condiciones de Falla	86
4.3.1	Corrosión	86
4.3.2	Fugas.....	91
4.3.3	Grietas.....	95
4.3.4	Incrustaciones	99
4.4	Discusión de resultados	104
CONCLUSIONES		105
BIBLIOGRAFÍA		109
ANEXOS		113
ANEXO A		
DIÁMETRO NOMINAL DE TUBERÍAS DE ACERO AL CARBONO		115
ANEXO B		
PROPIEDADES DE UNA BARRA MAGNÉTICA DE NEODYMIUM HIERRO-BORO.....		119
Anexo B-1		
Fuerza Coercitiva Barra Magnética de Neodymium Hierro-Boro		121

Anexo B-2	
Permeabilidad Magnética de una Barra Magnética de Neodymium Hierro-Boro.....	123
ANEXO C	
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO H	127
Anexo C-1	
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 0.5D	129
Anexo C-2	
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 1.0D	133
Anexo C-3	
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 1.5D	137
Anexo C-4	
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 2.0D	141
Anexo C-5	
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 2.5D	145
Anexo C-6	149
Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H- Distancia axial 3.0D	149
ANEXO D	
CÓDIGOS DEL PROGRAMA	153

Índice de Figuras

Figura 1.1 Fallas comunes en tuberías	7
Figura 1.2 Instrumento de Fuga de Flujo Magnético	11
Figura 1.3 Principio de MFL.....	12
Figura 1.4 Inspección por MFL	16
Figura 1.5. Modelo 3D MFL.....	16
Figura 1.6. Vista isométrica del mallado de los elementos en las fronteras por MEF.	17
Figura 1.7. Gráfica de la superficie para la componente axial y radial de la densidad del flujo magnético.....	17
Figura 1.8. Concepto del sistema de inspección de un imán permanente en rotación.....	18
Figura 1.9. Componentes fundamentales del imán permanente para inspección.	19
Figura 1.10. Señal baja para anomalías de corrosión con 7 configuraciones magnéticas a una frecuencia de rotación de 5 Hz.	21
Figura 1.11. Señal alta para anomalías de corrosión con 7 configuraciones magnéticas a una frecuencia de rotación de 10 Hz.	22
Figura 2.1. Dipolos alineados que representan la magnetización de un pequeño cubo. Estos dipolos dan lugar a un campo magnético en los puntos exteriores tales como S.	25
Figura 2.2. El efecto de los polos magnéticos en los puntos exteriores puede simularse mediante una corriente equivalente i_{mag} que circule alrededor de cada elemento de volumen.	26
Figura 2.3. Medida del campo magnético en un medio material en forma puntual o una larga cavidad cilíndrica.	27
Figura 2.4. Medición de la inducción del campo en un medio material en forma de disco o una corta cavidad cilíndrica.	27
Figura 2.5. (a) Condición de frontera en $\mathbf{H}$ para la interfaz entre dos medios. La componente tangencial de $\mathbf{H}$ es la misma en cada lado de la interfaz, si la interfaz no lleva corriente superficial. (b) Condición de frontera para $\mathbf{B}$ en la interfaz entre dos medios. La componente normal de $\mathbf{B}$ es la misma en cada lado de la interfaz.	30
Figura 2.6. Modelo equivalente de una tubería como línea de transmisión para corriente alterna.....	42
Figura 2.7 Equivalencia propuesta del ducto-imán con el de un transformador.	45
Figura 2.8. Configuración eléctrica del ducto.	45
Figura 2.9. Región del imán.	46
Figura 2.10. Región del imaginaria en el aire en la zona del imán.	46
Figura 2.11. Configuración eléctrica a lo largo del ducto.	48
Figura 2.12. Región 1 del ducto.	49
Figura 2.13. Región 1 en la zona del sensado.	50
Figura 3.1. Comportamiento de $\mathbf{H}$ en 2D.....	57
Figura 3.2. Gráfica del comportamiento de $\mathbf{H}$ en 2D.	58
Figura 3.3. Geometría del SOLID97.....	59
Figura 3.4. Esquema del dominio y contornos para un problema general de electromagnetismo.	60
Figura 3.5. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por dos medios.	62
Figura 3.6. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por dos medios donde la zona no conductora se ha dividido en Ω_2^Φ y Ω_2^Ψ	65
Figura 3.7. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por tres medios.	66
Figura 3.8. Configuración del imán y el ducto.....	68
Figura 3.9. Dimensiones del imán.....	69
Figura 3.10. Distancias axiales consideradas.	69
Figura 3.11. Configuración para el sensado.	70
Figura 3.12. Mallados para las simulaciones.	70
Figura 3.13. Distribución del campo magnético en el ducto.	72
Figura 3.14. Análisis de fallas a 0° , 45° y 90°	73

Figura 3.15. Esquema de la Grieta a 0°, 45° y 90°.....	74
Figura 3.16. Esquema de la Fuga a 0°, 45° y 90°.....	74
Figura 3.17. Esquema de la Incrustación a 0°, 45° y 90°.....	75
Figura 3.18. Esquema de la Corrosión a 0°, 45° y 90°.....	76
Figura 4.1. Área frontal considerada en el ducto.	80
Figura 4.2. Área de la sección frontal.	80
Figura 4.3. Área frontal considerada en el aire.	81
Figura 4.4. Comparación del flujo magnético MEFvsAnalítico en el ducto.	83
Figura 4.5. Comparación del flujo magnético MEFvsAnalítico en el aire.	83
Figura 4.6. Comportamiento de H en condiciones normales a diversas posiciones axiales y transversales.	85
Figura 4.7. Comparación de H con un mallado normal y uno fino a una distancia radial de 0.125 m (gap=2.255 mm)..	86
Figura 4.8. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 0°.	88
Figura 4.9. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 45°.	89
Figura 4.10. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 90°.	90
Figura 4.11. Variaciones de H debido a la corrosión.	91
Figura 4.12. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 0°.	92
Figura 4.13. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 45°.	93
Figura 4.14. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 90°.	94
Figura 4.15. Comportamiento de H debido a la Fuga.	95
Figura 4.16. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 0°.	96
Figura 4.17. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 45°.	97
Figura 4.18. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 90°.	98
Figura 4.19. Comportamiento de H debido a la Grieta.	99
Figura 4.20. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 0°.	100
Figura 4.21. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 45°.	101
Figura 4.22. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 90°.	102
Figura 4.23. Comportamiento de H debido a la Incrustación.	103

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Optimización geométrica del imán.	20
Tabla 3.1. Dimensiones del imán.	69
Tabla 3.2. Comparación de mallados.	71
Tabla 4.1. Valores considerados para el cálculo.	79
Tabla 4.2. Comparación de resultados analítico y MEF en la región 0.	84
Tabla C-1. Ubicación axial y radial para la detección de fallas.	107

Nomenclaturas

A	Área
$\mathbf{B}$	Densidad de flujo magnético
C	Capacitancia
dl	Diferencial de línea
ds	Diferencial de superficie
∇	Gradiente
$\mathbf{E}$	Campo Electrostático
$\mathcal{F}$	Fuerza magnetomotriz
G	Conductancia
$\mathbf{H}$	Campo magnético
i	Corriente
$\mathbf{J}$	Densidad de corriente
j_{mag}^s	Densidad de corriente solenoidal
L	Inductancia
l_m	Longitud media
μ	Permeabilidad del material
μ_0	Permeabilidad del vacío
$\mathbf{M}$	Magnetización del material
P	Polarización
p_m	Momento Magnético
ρ_m	Distribución de carga magnética
R	Resistencia
$\mathfrak{R}$	Reluctancia
U	Voltaje armónico
φ	Potencial magnetostático

ϕ	Flujo magnético
χ_m	Susceptibilidad magnética
Y	Admitancia
Z	Impedancia
Ω	Angulo sólido, Dominio de un medio

Introducción

La mayor parte de la economía mundial se basa en el consumo del petróleo y sus derivados. Grandes cantidades de actividades que dependen del petróleo y sus derivados tienen lugar en localizaciones muy alejadas, por lo que la distribución física de estos productos es una actividad de gran importancia. Sin embargo, existen muchos problemas relacionados con toda la cadena de suministros, desde su extracción en los yacimientos petrolíferos hasta la recuperación de los materiales de desecho obtenidos a partir de los mismos. Uno de los problemas fundamentales consiste en el movimiento de los diferentes productos y en particular en el transporte de los hidrocarburos refinados a partir del petróleo, de mayor importancia, como: gasolinas, gasóleos y kerosenos.

Se puede elegir diferentes medios para transportar dichos productos: camión cisterna, buque, oleoducto y ferrocarril. Cada uno de éstos presenta algunas ventajas dependiendo de la situación en la que son utilizados. En particular el oleoducto constituye un medio de transporte ventajoso o superior en el caso particular de transportar hidrocarburos entre puntos muy distantes. Los costos de construcción de oleoductos son elevados, pero pueden operar a cualquier hora del día y sólo emplean energía para desplazar el propio producto [1].

Muchos países industrializados utilizan tuberías para la distribución del petróleo y gas a distancias alejadas ya que es un medio de bajo costo. En la actualidad, el transporte a través de ductos en nuestro país ha cobrado interés, ya que el uso intensivo de transporte terrestre en pipas en trayectos largos genera costos adicionales contra otros medios más eficientes, seguros y económicos. Se estima que el costo que se paga por transportar por medios más ineficientes que el ducto, como es el caso del transporte por medio de pipas, es de alrededor de 2.5 mil millones de pesos anuales.

La preocupación en las redes de distribución son las fugas generadas mediante tomas clandestinas representando uno de los principales problemas a resolver ya que provocan enormes repercusiones económicas e implican el riesgo de accidentes con graves daños ecológicos. Otro punto a considerar es el envejecimiento de los ductos (con una antigüedad promedio entre 20 y 30 años), estando la gran mayoría de éstos enterrados o bien ubicados en lugares de difícil acceso, comprometiendo su constante mantenimiento.

No sólo las fugas pueden reducir la vida útil de los ductos, sino también las grietas, corrosión y desgaste provocan repercusiones. Para prevenir los problemas originados por fallas en los ductos existe un interés general por monitorear y evaluar las condiciones de los ductos con el propósito de prever y reconocer fallas en éstos. Para lograr esto, se han investigado diversos métodos y dispositivos los cuales pueden ser utilizados bajo ciertas condiciones de operación. Estos dispositivos de inspección, en donde se aprovecha la miniaturización de la microelectrónica, se introducen en la tubería de distribución del hidrocarburo; siendo éste transportado por el mismo flujo del hidrocarburo. Con la detección temprana, se busca disminuir daños ecológicos y humanos provocados por fugas en ducto.

Algunos dispositivos de inspección son conocidos como Diablos Instrumentados o por sus siglas en Inglés PIG's (Pipeline Inspection Gauges). Estos dispositivos pueden emplearse para limpiar el ducto de suciedades o material adherido a las paredes y discernir, almacenar la información adquirida durante el trayecto recorrido y una vez fuera del ducto, transferir tal información a una estación de trabajo con

software de análisis. En el segundo caso, se han empleado diversos métodos o sistemas con los que trabajan los PIG's, algunos de ellos son: corrientes de Eddy, ultrasonido, flujo magnético, óptico, físico entre otros. Estos métodos tratan de detectar diversos tipos de fallas presentes en los ductos. A pesar de los diversos métodos existentes el método de flujo magnético es el más utilizado ya que permite detectar la mayor parte de las fallas presentes en el ducto.

Desde sus inicios estos métodos han ido mejorando conforme se emplean nuevas tecnologías en los dispositivos de inspección como en la electrónica y exactitud en los sensores, el estudio de dichas fallas con métodos más modernos permite una mejor detección de estos. En cuanto a estos métodos algunos se apoyan en programas computacionales, los cuales permiten aproximar los resultados y dichos comportamientos. Algunos de estos programas empleados se encuentran los llevados a cabo por el Método del Elemento Finito (MEF), que son aplicados por algún software específico.

En la mayor parte de los análisis por el método de flujo magnético se emplea el MEF para caracterizar el comportamiento del campo magnético ante la presencia de una falla y denotar las características principales que ésta presenta.

Planteamiento del Problema

Para garantizar la operación y seguridad de los oleoductos utilizados en la distribución de hidrocarburos y gas natural, es importante mantener en buenas condiciones los ductos. Lo anterior ha originado el desarrollo de diversos métodos y dispositivos que permiten determinar las condiciones y defectos de los ductos. Dichas condiciones y defectos dependen de la antigüedad, condiciones climáticas, instalación y el tipo de uso que se le da.

Uno de los métodos más utilizados es el método de flujo magnético debido a que se pueden detectar la mayor parte de los defectos. Sin embargo, en la mayoría de la literatura solo se enfoca en el análisis de la grieta y el efecto que tiene en el comportamiento del campo magnético en las cercanías de la superficie interna del ducto y no existen muchos estudios enfocados al análisis de otro tipo de fallas. Por tal razón, surge la necesidad de analizar diferentes fallas y obtener un patrón que permita caracterizar cada una de ellas.

El problema a tratar en este trabajo de tesis es el análisis de las condiciones nominales y las condiciones de falla del ducto. Para el segundo caso se pretende obtener la caracterización de diferentes tipos de fallas permitiendo conocer el tipo de defecto presente y las condiciones probables en las que se encuentre el ducto para tomar medidas correctivas necesarias. Con esto, se asegura la integridad de los ductos y una continua distribución del hidrocarburo y sus derivados.

Objetivo General

Analizar, modelar y simular el comportamiento de la distribución del flujo magnético generado por un imán permanente en tuberías ferromagnéticas bajo condiciones nominales y bajo condiciones de diversos tipos de fallas tales como corrosión, fugas, grietas e incrustaciones en la tubería.

Objetivos Particulares

- Revisar el estado del arte del comportamiento de la distribución de flujo magnético de un imán permanente en tuberías.
- Analizar y modelar teóricamente la distribución del flujo magnético en tuberías.
- Modelar y simular por MEF la distribución del flujo magnético en tuberías ferromagnéticas bajo condiciones nominales.
- Modelar y simular por MEF la distribución del flujo magnético en tuberías ferromagnéticas bajo condiciones de falla.
- Analizar la localización de sensores para los diversos tipos de fallas.
- Caracterizar la variación del campo magnético bajo las distintas condiciones de falla.

Organización de la tesis

El presente trabajo está distribuido de siguiente manera: En el Capítulo 1 se da una introducción de los diversos métodos y dispositivos utilizados para la inspección así como algunas ventajas y desventajas que éstos presentan. También se mencionan algunos trabajos previos en donde utilizan el método de inspección de flujo magnético.

El Capítulo 2 describe la parte analítica de los fenómenos de campo magnético en un medio material y su relación con éstos. También se presentan algunas aproximaciones analíticas de cómo modelar el fenómeno de campo magnético generado por un sistema de protección catódica en ductos ferromagnéticos y por último se expone una aproximación propuesta del modelado teórico del flujo magnético en la zona del imán y a lo largo del ducto.

El Capítulo 3 describe los pasos y consideraciones tomados en cuenta para modelar y simular por MEF los fenómenos de campo magnético generados por el imán en el interior del ducto ferromagnético y cómo es la distribución de éste a lo largo del ducto a través de un software de simulación para condiciones nominales y diferentes condiciones de falla.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del modelo teórico propuesto y el comportamiento del campo magnético en condiciones nominales y condiciones de falla. También, se tiene una discusión de resultados obtenidos para cada tipo de análisis.

Capítulo 1

Antecedentes Teóricos

1.1 Inspección en Ductos

La inspección se puede definir como una técnica para encontrar imperfecciones relevantes o simples sobre la superficie externa e interna de las tuberías. Es una prueba no destructiva para detectar y determinar defectos y fallas en el material. Estas imperfecciones pueden ser provocadas por errores internos (materiales, procesos de manufactura, diseño) o por interferencia externas (desastres naturales, excavaciones por terceras partes, sabotaje). En el caso de gaseoductos y oleoductos, este tipo de defectos no sólo pueden provocar problemas ambientales y pérdidas económicas, si no en ocasiones pérdidas humanas. En general, las fallas se pueden clasificar como instantáneas y dependientes del tiempo. Una falla instantánea puede ocurrir tempranamente en el ciclo de vida de la estructura por errores de diseño, construcción, materiales o inspección. Como también una falla instantánea puede ocurrir después de varios años de operación debido a fenómenos naturales como tormentas severas, terremotos, inusuales bajas de temperatura, o por daños generados por terceros. Las fallas dependientes del tiempo están asociadas con mecanismos de crecimiento de fisuras por fatiga y arrastre (creep), corrosión bajo tensión, otras formas de corrosión y desgaste.

La frecuencia de la falla en un sistema de tuberías depende de diversos factores que muchas veces no pueden ser establecidos cuantitativamente. Sin embargo, tomando en cuenta los datos históricos de escenarios de falla, así como de probabilidades de ocurrencia se han podido establecer las causas más probables que se pueden presentar, tal como se muestra en la Figura 1.1 [2].

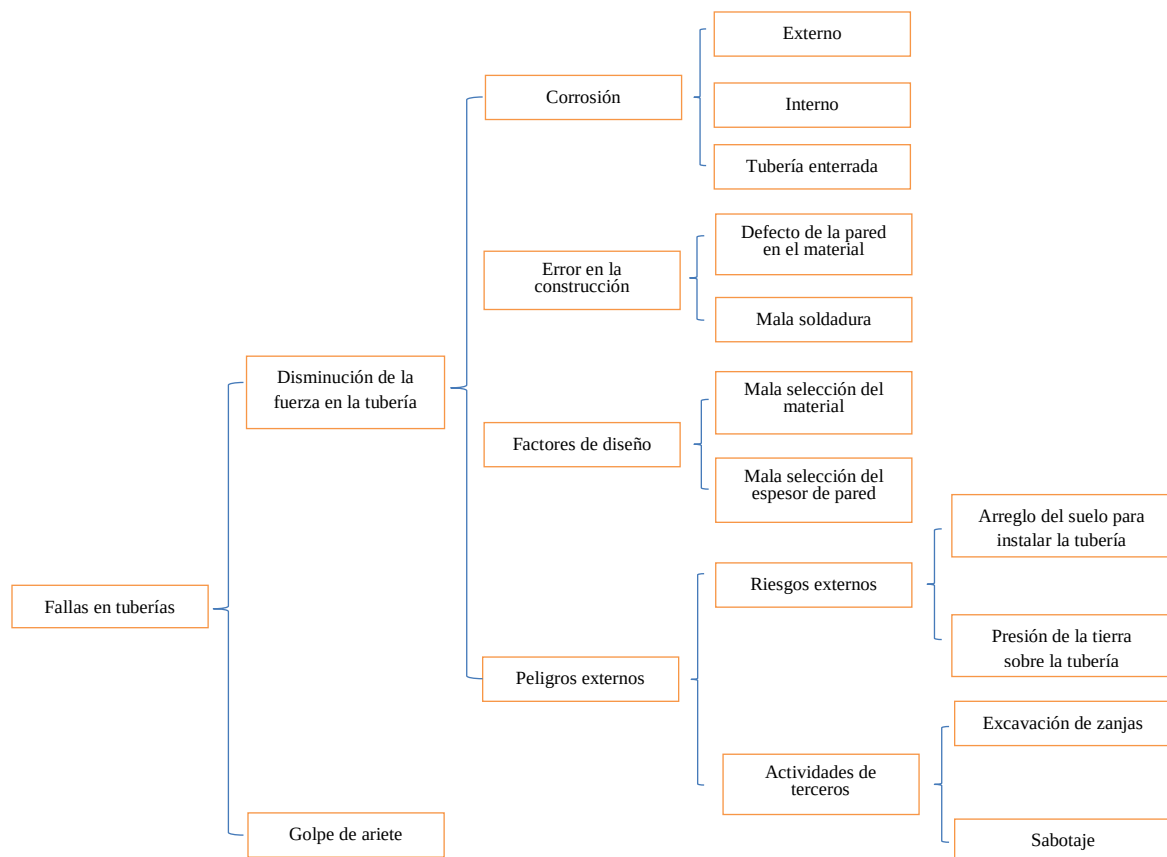


Figura 1.1. Fallas comunes en tuberías.

1.2 Métodos de Inspección en Ductos

La inspección en ductos se lleva a cabo mediante un mantenimiento predictivo el cual proporciona información de las condiciones físicas por medio de ensayos no destructivos. Una prueba no destructiva se puede definir como el uso de una técnica no invasiva para determinar la integridad de un material, componente o estructura y cuantitativamente medir algunas características del objeto, las cuales pueden llevarse a cabo directa o indirectamente [3].

1.2.1 Inspección Directa

Como su nombre lo indica esta inspección se lleva a cabo directamente sobre el material. Entre los métodos mas comunes de pruebas no destructivas para inspección directa se encuentran:

- Visual
- Líquidos penetrantes
- Magnético
- Ultrasonido
- Corrientes de Eddy
- Rayos X

1.2.1.1 Inspección Visual

Este método se utiliza para detectar y dimensionar los defectos en la superficie exterior de la pared del ducto o equipo, siempre que ésta se encuentre al descubierto, ya sea por instalación aérea o por la práctica de excavación o inspección submarina, previa remoción del recubrimiento. Los defectos que se incluyen son: picaduras, abolladuras, entallas, fugas, defectos externos de uniones soldadas, anomalías en soportes, deformaciones, pliegues, defectos de recubrimiento, vibración y contacto físico con cuerpos y estructuras ajenas al ducto [4].

1.2.1.2 Líquidos Penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es empleada para detectar e indicar discontinuidades que afloran a la superficie de los materiales examinados. En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad, después de cierto tiempo se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

Si se requiere detectar discontinuidades con un tamaño de aproximadamente medio milímetro (0.012" aproximadamente), debe emplearse un penetrante fluorescente, removible por post-emulsificación y un revelador seco. Por otra parte, si lo que se necesita es detectar discontinuidades mayores a 2.5 mm (0.100" aproximadamente), conviene emplear un penetrante contrastante, lavable con agua y un revelador en suspensión acuosa.

1.2.1.3 Magnético

La inspección por partículas Magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferro-magnéticos, se selecciona usualmente cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes.

El principio del método es la formación de distorsiones del campo magnético o de polos cuando se genera o se induce un campo magnético en un material ferromagnético; es decir, cuando la pieza presenta una zona en la que existen discontinuidades perpendiculares a las líneas del campo magnético, éste se deforma o produce polos, las distorsiones o polos atraen a las partículas magnéticas, que fueron aplicadas en forma de polvo o suspensión en la superficie sujeta a inspección y que por acumulación producen las indicaciones que se observan visualmente de manera directa o bajo luz ultravioleta [5].

1.2.1.4 Ultrasonido

Este método se puede dividir en dos tipos las cuales pueden ser:

Haz recto : Detecta y dimensiona corrosión interna y externa, corrosión axial de extensión reducida, arrancaduras, laminación, inclusiones no metálicas, abolladuras, detección de espesores en forma directa, defectos adyacentes a soldadura, presencia de soldadura transversal y longitudinal así como la presencia de accesorios de instalaciones superficiales.

Haz angular: Detecta la mayor parte de los defectos que el haz recto, además obtiene información concisa de las anomalías existentes en el flujo transversal, pero se pierde precisión en información de las anomalías en el sentido longitudinal.

Ambos son utilizados únicamente en ambiente líquido o en ductos que transportan gas, mediante un acoplante líquido [6].

Su principio de funcionamiento se basa en que las ondas ultrasónicas pasan a través de los sólidos y son reflejados al llegar a los límites de éstos. En los puntos donde existe una discontinuidad, las ondas no pueden pasar y son reflejadas produciendo un eco. Este eco se muestra en un tubo de rayos catódicos revelando la presencia de los defectos [4].

1.2.1.5 Corrientes de Eddy

Las corrientes de Eddy es el mejor método para la inspección de tuberías no ferromagnéticas. Esta técnica es aplicable en acero inoxidable austenítico, bronce, cobre, titanio, latón y otros.

A través de un emisor y receptor de corrientes de Eddy, un sensor de multifrecuencia y multicanal diseñados para trabajar a alta velocidad, pueden lograrse rendimientos de hasta 2 m/s con cuatro frecuencias simultáneas y ocho canales de entrada. Utilizando un software específico, se obtienen pantallas múltiples de 12 gráficos y 16 planos de impedancia [7].

1.2.1.6 Rayos X

El método emplea Rayos X, gamma o radiación similar penetrante para revelar defectos, discontinuidades, inclusiones, espesor o estructura de los objetos, el método aprovecha la facilidad con que los rayos X o gamma pueden penetrar materiales opacos. Si existe una falla ésta aparece más clara en una película sensible a la radiación, debido a que los rayos penetran menos material en estas discontinuidades.

La radiación ionizante que logra traspasar el objeto puede ser registrada por medio de la impresión de una placa o papel fotosensible, que posteriormente se somete a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada o bien por medio de una pantalla fluorescente o un tubo de video, para después analizar su imagen en una pantalla de televisión o grabarla en una cinta de video [8].

1.2.2 Inspección Indirecta

Para inspecciones en ductos de difícil acceso o tubería enterrada se emplean dispositivo a control remoto los cuales monitorean las condiciones del ducto, conocidos como diablos instrumentados o sus siglas en Inglés PIGS (Pipelines Inspection Gauges).

Usualmente los dispositivos instrumentados o PIGS son contruidos de igual diámetro que el de la tubería, donde éstos pueden usar el flujo normal del fluido para transportarse a lo largo de la tubería. Los PIGS han sido utilizados en tuberías por muchos años y tienen varios usos como son: para limpiar e inspeccionar.

El 1961 se desarrolló el primer PIG por Shell Development, el cual contenía instrumentos electrónicos que moviéndose a través del ducto podía medir y registrar el espesor de pared. El instrumento usaba campos electromagnéticos para percibir el espesor de pared.

Los PIGs ahora son usados para la inspección de la pared interna de la tubería y superficies en busca de anomalías (abolladuras, colapso parcial, superficies con grietas largas, corrosión de la soldadura, depósitos, etc.) y registrar la condición real de la tubería, se utilizan diferentes tipos de PIG para determinar el espesor de pared y el defecto del material.

El primer tipo de PIG se basa en la óptica usando camaras, láseres o equipos calibrados. El otro tipo de inspección utiliza métodos robustos para detectar los defectos del material, son conocidos como dispositivos inteligentes porque contienen electrónica y éstos pueden recolectar e incluso procesar datos en tiempo real cuando viajan a través de la tubería, llevan sistemas electrónicos sofisticados lo cual permite detectar con exactitud las pequeñas fallas presentes.

Algunos tipos de PIGS que se han utilizado son:

- Fuga de Flujo Magnético (MFL)
- Ultrasonido (Piezoeléctrico y EMAT)
- Óptica (video, láser)
- Físico (Calibrador)

1.2.2.1 Fuga de Flujo Magnético (MFL)

La inspección por Fuga de Flujo Magnético es uno de los métodos más comunes para encontrar la pérdida de metal en tuberías. El MFL de forma fiable puede detectar la pérdida de metal, grietas en soldadura, cordones de soldadura, objetos metálicos adyacentes, abolladuras, fragilización de grietas en soldadura e inclusiones no metálicas y típicamente es un instrumento que consiste en dos o más cuerpos que son: Un cuerpo es magnetizado con los imanes y sensores en tanto el otro cuerpo contiene la parte electrónica . El primero alberga los sensores que están localizados entre los imanes de tierras raras.

En un instrumento por MFL los sensores pueden tomar lectura ya sea sobre por la distancia recorrida del instrumento o en incrementos de tiempo. La selección depende de muchos factores tal como: la longitud del recorrido, la velocidad a la que viaja el instrumento y el número de paradas o cortes que pueda experimentar. En la Figura 1.2, se muestra un instrumento utilizado para este tipo de inspección [9].



Figura 1.2. Instrumento de Fuga de Flujo Magnético [10].

El principio de la técnica MFL es aplicar un campo magnético al material de la tubería hasta el punto de saturación magnética. Un circuito magnetizante se muestra en la Figura 1.3; este normalmente consiste de

una red de imanes permanentes, una barra sostén conductora de campo y un juego de escobillas de acero para inducir el campo magnético hacia la pared de la tubería. La señal de fuga de flujo magnético se obtiene en la superficie de la pared de la tubería magnetizada.

La densidad del campo magnético en la pared de la tubería será afectada si existe una anomalía y como resultado el campo en la superficie interior de la tubería cambiará. Para registrar este cambio en el campo magnético se coloca un sensor en medio de los dos polos del ensamble magnético. La pequeña señal MFL puede ser hasta $1/10,000$ la densidad del flujo en la pared de la tubería.

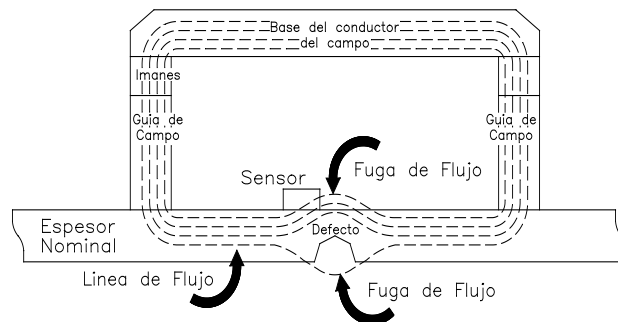


Figura 1.3. Principio de MFL.

El campo magnético en la región del sensor consiste parcialmente de la fuga de flujo directa a través de los polos magnéticos y la fuga de flujo causada por la anomalía en la pared de la tubería. El grado de magnetización de la pared depende primeramente del diseño del ensamble magnético. Sin embargo, las propiedades magnéticas del material de la tubería y del espesor de la pared también son componentes mayores a considerar. Generalmente, es más fácil saturar tuberías de paredes delgadas que aquellas de paredes gruesas [11]. Los tipos de fallas que se pueden detectar son:

- Pérdida de metal
- Deformación plástica

Sus ventajas:

- Varían los niveles de prueba que se pueden escoger de acuerdo a las necesidades
 - Baja resolución
 - Alta resolución
 - Extra-alta resolución (depende del número de sensores)

y sus desventajas:

- Existe magnetización residual en la tubería

1.2.2.2 Ultrasonido

Los PIGS que utilizan tecnología UT, pueden dividirse en dos categorías, el primero utiliza transductores piezoeléctricos los cuales tienen una larga historia operacional, esta tecnología se usa para tuberías llenas de líquidos y requiere el contacto entre el transductor y la pared de la tubería. La otra categoría es el EMAT que provee de tecnología con la posibilidad de un escaneo ultrasónico sin contacto directo con la pared del tubo.

Piezoeléctrico UT (eco-pulso)

La prueba ultrasónica, utiliza un transductor ultrasonico conectado a una máquina de diagnóstico que pasa sobre el objeto inspeccionado. El transductor es normalmente separado del objeto de prueba por un acoplador (aceite) o agua, como una prueba de inmersión.

Hay dos métodos para recibir la forma de onda ultrasonica, reflexión y atenuación. La reflexión es la tecnología utilizada por los PIGs inteligentes, en la reflexión (eco-pulso), el transductor realiza el envío y la recepción de las ondas de pulso, ya que el sonido se refleja de vuelta al dispositivo. El ultrasonido reflejado viene de una interfaz, como la pared del fondo del objeto o una imperfección, la máquina de diagnóstico muestra los resultados en forma de una señal con una amplitud que representa la intensidad de la reflexión, distancia y el tiempo de llegada de la reflexión.

Los tipos de fallas que se pueden detectar a través de este método son:

- Pérdida de metal Interna/Externa
- Canalización longitudinal
- Abolladuras/Inclusiones
- Deformaciones
- Bridas
- Laminaciones
- Agrietamientos
- Soldadura característica
- Variaciones de espesor
- Utilizable en curvas y válvulas

Las ventajas:

- Es un método directo para la medición del espesor de pared y es confiable en cuanto al tamaño y profundidad del defecto
- No hay límite superior en el espesor de la pared de la tubería
- Es sensible a un mayor número de funciones que MFL

Sus desventajas:

- Es difícil el acoplamiento en la pared del tubo con movimiento rápido del PIG

Transductor Electromagnético Acústico (EMAT)

Un transductor Electromagnético Acústico (EMAT) es un dispositivo sin contacto que genera un pulso ultrasónico en la pared del tubo, las ondas reflejadas en la pared del tubo inducen una corriente eléctrica variable en el receptor; esta señal de corriente es interpretada por el software para proporcionar pistas sobre la estructura interna del material en la pared del tubo.

Cualquier falla o grieta constituye un límite que resulta en la reflexión parcial de la incidencia del pulso ultrasónico. Conociendo la velocidad del ultrasonido en la muestra, la profundidad de la grieta puede ser calculado, esto se hace para reducir a la mitad el tiempo entre la generación del pulso y la recepción de la señal reflejada. Así, utilizando un EMAT es posible crear un perfil del interior de la muestra sin tener que dañar o deformar de alguna manera el ducto, así como en las grietas del interior, el ultrasonido se puede reflejar en la frontera exterior de la muestra, el cual es útil para calcular el espesor de tuberías metálicas.

Con este método se pueden detectar las siguientes fallas:

- Pérdida de metal Interna/Externa
- Canalización longitudinal
- Abolladuras/Inclusiones
- Deformaciones
- Bridas
- Laminaciones
- Agrietamientos
- Soldadura característica
- Variaciones de espesor
- Utilizable en curvas y válvulas

Las ventajas que tiene:

- Acoplamiento en seco y fácilmente aplicable en las tuberías de gas
- Mejora la capacidad de ondas de corte polarizadas horizontalmente, para la inspección en áreas como soldaduras
- Mejora la fiabilidad del proceso debido a la ausencia de un medio acoplado, reduciendo el riesgo de pasar por alto los defectos de acoplamiento

y las desventajas:

- El EMAT tiene que estar situado a 1 mm del objeto de prueba
- La transmisión de energía ultrasónica es relativamente baja, debido a esto el rango dinámico se determina por el ruido eléctrico
- No se pueden aplicar altas frecuencias

1.2.2.3 Inspección Óptica

La inspección visual de tuberías es posible a través de PIGs ópticos, hay diferentes enfoques utilizados para esta aplicación, como cámaras montadas con iluminación. Estos sistemas proveen inspección visual directa pero son bastante limitadas, ya que es difícil evaluar la geometría de la tubería; la razón es que la iluminación de video óptico se aplana en la pared de la tubería (reduciendo contraste de la imagen). Las deformidades y anomalías necesitan ser muy grandes para ser vistas.

Un desarrollo de esta tecnología es el uso de un láser montado delante de la cámara que genera luz perpendicular a la línea central de la tubería, generando un esquema real de la tubería con bastante claridad, de esta manera es posible ver de forma elíptica a la tubería, detectando abolladuras y otros elementos geométricos.

Como su nombre lo indica la inspección visual requiere que el líquido de la tubería sea transparente, para inspección de video se utiliza a menudo como la inspección de tuberías de restricción antes de ejecutar las herramientas más grandes y sofisticadas [9].

1.2.2.4 Físico (Calibrador)

El calibrador ILI emplea herramientas para medir la geometría circunferencial de la tubería, hay diferentes herramientas que son usadas tales como calibradores físicos, láser o equipo de sondeo acústico (placas de metal en contacto con la pared del tubo). Las herramientas más sencillas de calibración desvían las hojas de metal sobre el PIG para establecer el diámetro mínimo de la tubería. El calibrador ILI se usa normalmente cuando se sospechan grandes deformaciones en la tubería que pueda comprometer la integridad del ducto [10].

1.3 Antecedentes de la Inspección por Flujo Magnético

El método de inspección por Fuga de Flujo Magnético (MFL) se basa principalmente en la generación de un campo magnético y la variación que éste pueda presentar ante la presencia de una falla, para este tipo de análisis y con los desarrollos tecnológicos con los que se cuenta hasta el momento se emplean dispositivos de inspección provistos de sensores y con la ayuda de herramientas computacionales permiten mostrar el comportamiento del flujo magnético ante la presencia de una falla durante la inspección. Ciertos trabajos que se han realizado para la detección de fallas a través de este método de inspección, se basan en la evaluación del campo magnético y modelado o reconstrucción de las fallas a través de diversos métodos de aproximación. Entre algunos trabajos que se han llevado a cabo para el estudio de fallas, se puede hacer mención de los siguientes:

1.3.1 Pruebas en Tuberías de Acero Usando el Método de Fuga de Flujo Magnético [12]

Con el gran desarrollo de redes de tuberías para gas y petróleo, la inspección de tuberías se ha utilizado extensamente, en este método por fuga de flujo magnético (MFL) es la técnica de inspección más utilizada para evaluar las tuberías de gas y petróleo. En este tipo de prueba se presenta los defectos en tres dimensiones (3D), donde se modela con detalle y precisión. La señal MFL se lleva a cabo en una superficie de prueba calculado a través del Método del Elemento Finito (MEF). El MFL, es una prueba electromagnética que solo puede ser usada para materiales conductores. La prueba MFL se muestra en la Figura 1.4.

El campo magnético cerca de las tuberías es una medida de las condiciones en las que se encuentran los ductos. Por ejemplo, una disminución del espesor de pared de la tubería conduce a una perdida del campo magnético en la pared dentro o fuera de la tubería.

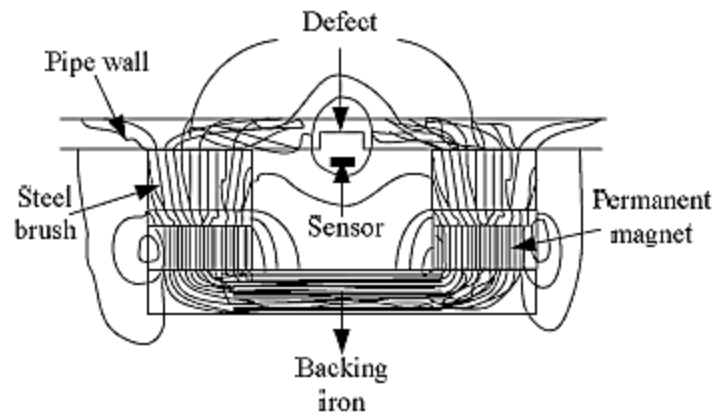


Figura 1.4. Inspección por MFL [12].

Se utilizan imanes permanentes de Neodimio (NdFeB) cerca de la pared del tubo, el cual satura con flujo magnético en la dirección axial y cualquier pérdida de metal en la pared de la tubería causa una perturbación local de la distribución del campo magnético. Los sensores de campo magnético se instalan alrededor de la circunferencia del dispositivo de inspección entre los dos polos para medir la fuga de flujo magnético. En la Figura 1.5 se muestra el modelo simplificado en 3D del MFL.

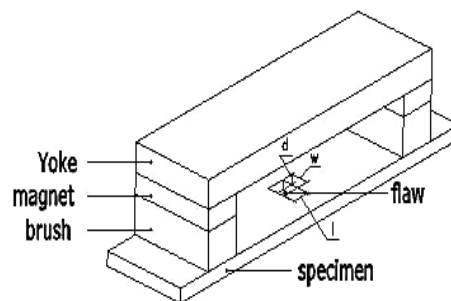


Figura 1.5. Modelo 3D del MFL [12].

El circuito magnético consiste en un acoplamiento, imán permanente, escobilla y la tubería. Los dos imanes permanentes son usados para inducir el flujo magnético y magnetizar la tubería, acumulando en el material alta energía magnética. Cuya fuerza coercitiva es de 872000 A/m y una propiedad magnética estable. Se considera un espesor de la muestra de 12 mm, el modelado 3D del MFL es discretizado por elementos tetraédricos como se muestra en la Figura 1.6. En la figura 1.7, se muestra la gráfica de la superficie para la amplitud radial y la componente axial de la densidad de flujo magnético en la región del flujo el cual es de 10 mm × 10 mm × 6 mm.

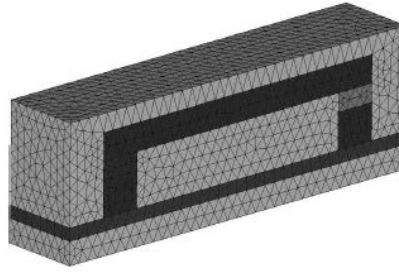


Figura 1.6. Vista isométrica del mallado de los elementos en las fronteras por MEF.

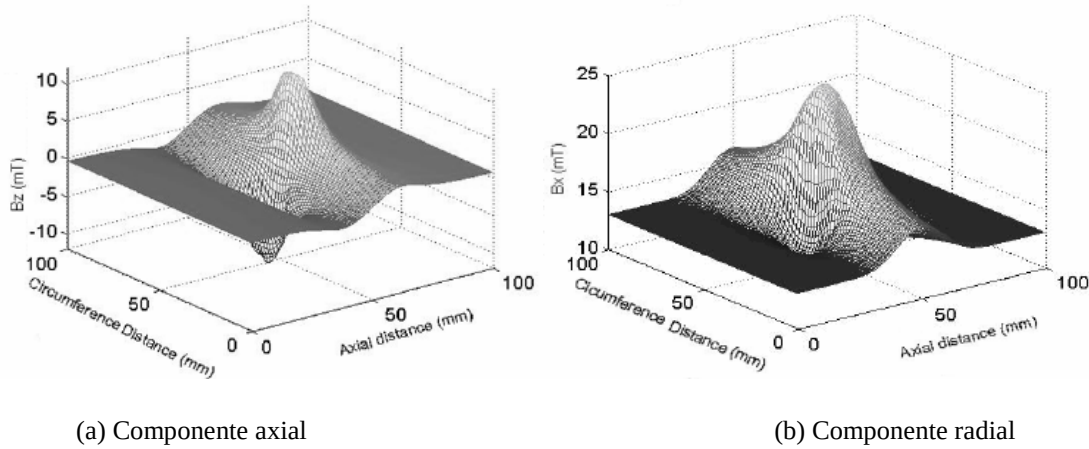


Figura 1.7. Gráfica de la superficie para la componente axial y radial de la densidad del flujo magnético [12].

El imán permanente montado incluye un circuito magnético, un sondeo Hall y una señal de circuito preprocesado. Un motor DC, un activador y dos relevadores que constituyen el control del motor DC; el cual es usado para el movimiento del imán permanente.

Para el monitoreo y el registro se utilizan 16 sensores de efecto Hall para medir la fuga del flujo con la amplificación necesaria para filtrar y registrar la señal. Como la muestra tiene un espesor de 12 mm, los defectos varían de espesor según 100% (12 mm), 50% (6 mm), 20% (2.5 mm), 10% (1.2 mm) respectivamente.

1.3.2 Sensores Innovadores Electromagnéticos para el Rastreo de Tuberías [13]

Una nueva metodología por sus siglas en inglés RPMI (Rotating Permanent Magnet Inspection), el cual ha sido exitoso para la inspección de tuberías, utiliza pares de imanes permanentes que giran alrededor de un eje central, induciendo suficiente densidad de corriente en la tubería sometido a inspección. Las anomalías y variaciones de espesor de pared causan cambios locales en el campo magnético producido por las corrientes inducidas, el cual puede ser detectado usando el efecto Hall del sensor.

EL RPMI se basa en las leyes fundamentales de la inducción eléctrica por la rotación del imán permanente dentro de la tubería a lo largo del eje longitudinal, donde una corriente eléctrica alterna se establece en la pared de la tubería. En la figura 1.8, se muestra una sección dibujada del imán permanente excitado en rotación, el cual ilustra este concepto. Este sistema tiene la potencia de inducir fuertes corrientes de Eddy en la pared de la tubería. Así, como líneas discontinuas del flujo de corriente y como el magnetizador gira en la tubería.

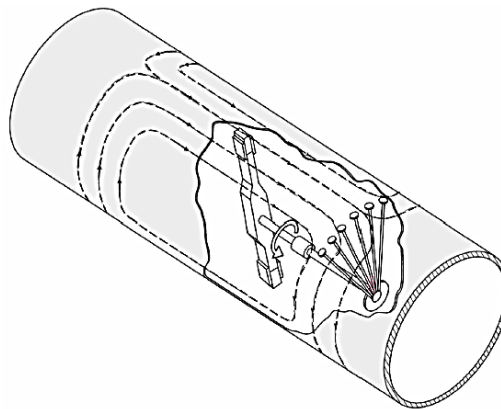


Figura 1.8. Concepto del sistema de inspección de un imán permanente en rotación [13].

En el prototipo experimental utilizan un magnetizador con dos polos, donde fuertes densidades de corriente son producidas a distancias lejanas del magnetizador montado. A pesar de que la corriente es compleja en los polos magnéticos a un diámetro más lejano del magnetizador, la corriente es uniforme y sinusoidal. Los defectos son detectados sensando cambios en la corriente sinusoidal. En este tipo de prueba se incluyen tuberías con un rango de 20.32 a 45.72 cm (8 a 18 in).

El sistema de inspección por rotación de un imán permanente consiste en una barra magnética que gira en el eje de un motor, las metas de la prueba son:

- Maximizar corrientes lejanas al girar los imanes tal que los cambios debido a las anomalías produzcan señales largas.
- Minimizar la potencia requerida del motor para girar los imanes que permita inspecciones largas en el recorrido con una sola carga de batería.
- Minimizar el tamaño del sistema de inspección tal que sea capaz de pasar en entradas menores al diámetro nominal.

El primer paso es determinar el número de imanes y el comportamiento del campo en el sistema de inspección por rotación de un imán permanente que se deriva a través de la Ley de Ampere y la Ley de Conservación de la Carga. El pico de amplitud del campo magnético como una función de la posición axial está dada por la siguiente ecuación:

$$B_{px}(z) \propto \frac{\beta}{n} \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 M_0 e^{-\left(\frac{n}{r}\right)z} \quad (1.10)$$

Donde:

- Z es la distancia desde el imán a lo largo de la tubería
- r es el radio
- n es el número de pares de polos
- δ es el espesor de la casaca
- β es el factor de acoplamiento que incluye la separación entre el imán y el tubo (entre 0 y 1)
- M_0 es la energía magnética en la pieza del polo magnético

Esta ecuación indica que el pico de amplitud del campo magnético es proporcional a la intensidad magnética de la pieza del polo y al cuadrado del radio de la tubería sobre el espesor del casaca e inversamente proporcional al número de polos.

Los experimentos realizados sobre 15.24 cm (6 in), 20.32 cm (8 in), y 30.48 cm (12 in) de diámetro de tubería muestran que la unión directa del campo desde los imanes a los sensores no tiene una relación significativa con el diámetro de la tubería. En general, una barra magnética de un par de polos, puede ser considerado suficiente para trabajar con diámetros de 15.24 cm a 40.64 cm y para diámetros mayores de 40.64 cm, se puede usar una configuración de dos pares de polos magnético.

En la Figura 1.9 se muestran los parámetros de la barra magnética que incluye la longitud axial, ancho circunferencial y espesor radial de los imanes, así como la separación del imán con la pared de la tubería.

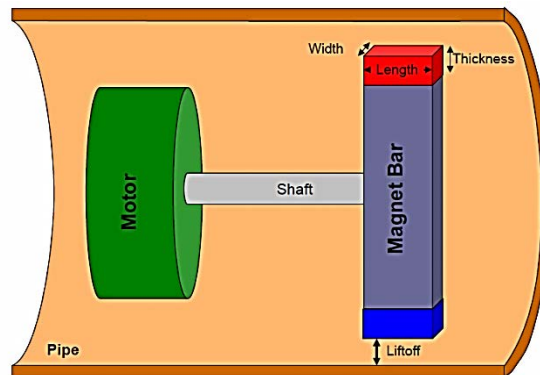


Figura 1.9. Componentes fundamentales del imán permanente para inspección [13].

En los análisis de 20.32 cm y 30.48 cm en ambos se utilizan prototipos de 5.08 cm (2 in) de longitud, 2.54 cm (1 in) de ancho y 1.27 cm (½ in) de ladrillos gruesos de neodimium hierro-boro, con energía que produce 35 MGOe (Megagauss Oersted).

El objetivo es canalizar el flujo magnético dentro de la pared en la tubería y cualquier variación de tamaño pudiera establecer caminos alternos para el flujo magnético el cual pudiera reducir la generación de corriente, en los imanes que sostienen la barra magnética se tiene una fuerza de atracción de 50 pounds o mayor. Para establecer la geometría óptima de magnetización se toma un rango de longitud, ancho, espesor, separación del imán y la pared del tubo. La configuración de estas pruebas se muestran en la Tabla 1.1.

Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Separación (cm)
5.08	2.54	1.27	1.27
2.54	2.54	3.81	1.27
2.54	2.54	3.81	2.54
2.54	2.54	1.27	1.27
2.54	2.54	1.27	2.54
2.54	1.27	1.27	1.27
2.54	1.27	1.27	2.54

Tabla 1.1. Optimización geométrica del imán.

En la prueba de 20.32 cm (8 in) se construyó una anomalía para cuantificar la capacidad de detección para cada configuración del imán. La muestra tiene 7 anomalías de pérdida de metal.

- N1: 2.54 cm de longitud, 7.26 cm de ancho, 30% de profundidad
- N2: 2.54 cm de longitud, 7.26 cm de ancho, 70% de profundidad
- N3: 2.54 cm de longitud, 7.26 cm de ancho, 50% de profundidad
- N4: 2.54 cm de longitud, 5.08 cm de ancho, 50% de profundidad
- N5: 5.08 cm de longitud, 5.08 cm de ancho, 50% de profundidad
- N6: 2.54 cm de longitud, 2.54 cm de ancho, 50% de profundidad
- N7: 7.26 cm de longitud, 2.52 cm de ancho, 50% de profundidad

Las primeras tres anomalías son usadas para examinar el efecto del espesor, las anomalías N3 y N7 son usadas para examinar el efecto y orientación, las anomalías N4, N5, y N6 son usadas para examinar el efecto del área. La inspección en las muestra de la tubería se llevo a cabo cuando se varió la frecuencia rotacional del imán entre 3 y 20 Hz y midiendo la potencia eléctrica suministrada por el motor en cada frecuencia. En la Figura 1.10 se muestra la señal de amplitud para las tres primeras anomalías de pérdida de metal (30%, 50% y 70% del espesor de pared), para las 7 diferentes configuraciones magnéticas con una velocidad rotacional de 5 Hz. En la Figura 1.10 se presentan los resultados obtenidos a esta frecuencia.

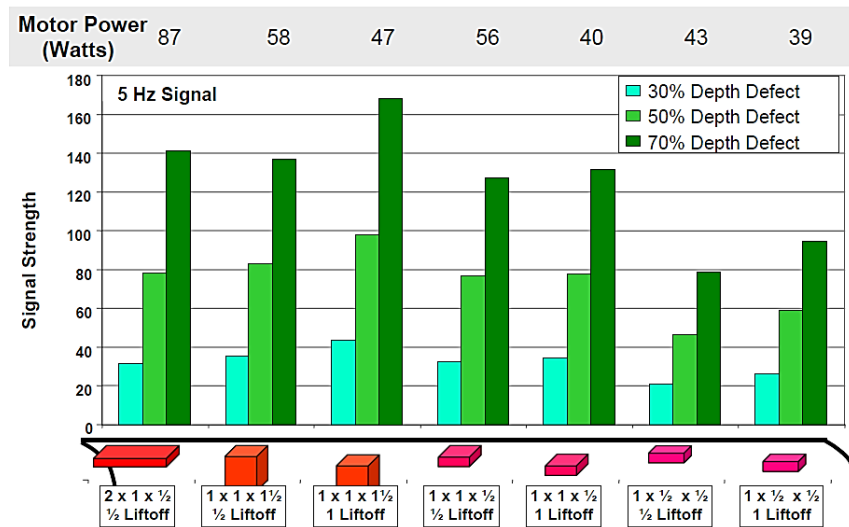


Figura 1.10. Señal baja para anomalías de corrosión con 7 configuraciones magnéticas a una frecuencia de rotación de 5 Hz [13].

Las siguientes observaciones describen los resultados obtenidos:

- La configuración magnética de 2.54×2.54×3.81 cm (1×1×1.5 in) y 2.54 cm de separación produce una señal larga
- El imán de 2.54 cm de separación produce una mejor señal que una de 1.27 cm de separación
- La potencia del motor requerida para mantener la velocidad rotacional era más grande para 1.27 cm de separación que para el imán de 2.54 cm de separación.
- En ambos, en 1.27 y 12.54 cm de separación, la fuerza de la señal para el imán pequeño (2.54×1.27×1.27 cm) fue significativamente más débil que 2.54×2.54×1.27 cm donde la potencia requerida fue ligeramente menor.

Resultados similares se presentan en la Figura 1.11, con una frecuencia de 10 Hz. En conjuntos los niveles de señal de baja y alta frecuencia, tienen una tendencia similar. Los resultados experimentales son ejemplos para una tubería de 20.32 cm (8 in) de diámetro, con valores óptimos para cada configuración magnética las cuales pueden variar para diferentes diámetros de tubería. Del diseño RPMI, se pueden extraerlos siguientes resultados:

- El posicionamiento del imán más lejano de la pared del tubo es mejor para ambas señales de fuerza y potencia
- Un área magnética más grande (largo y ancho del imán) no es necesariamente mejor y un área magnética de 2.52×2.54 cm es mejor estas dos configuraciones 5.08×2.54 cm y 2.52×1.27 cm
- Imanes gruesos tienden a dar mejores resultados, pero diseños prácticos tienden a reducir el tamaño del grosor.

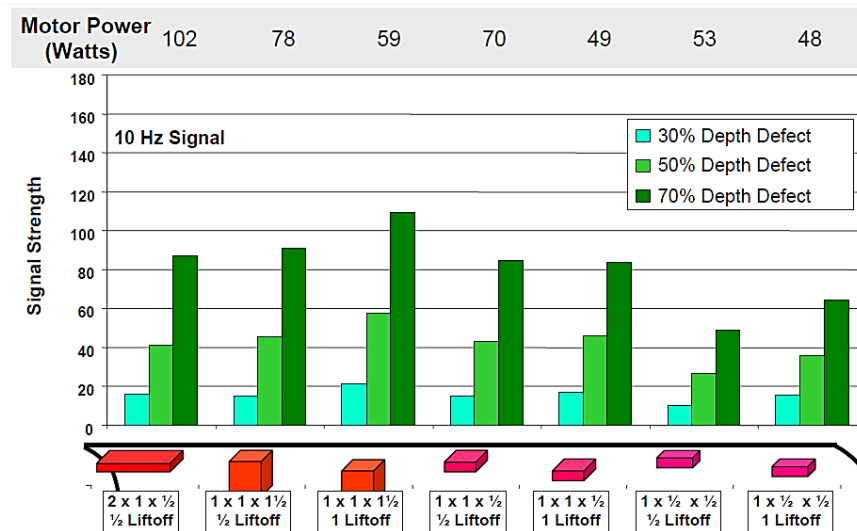


Figura 1.11. Señal alta para anomalías de corrosión con 7 configuraciones magnéticas a una frecuencia de rotación de 10 Hz [13].

Los primeros principios indican que imanes grandes cerca de la superficie podrían incrementar la generación de corriente, las primeras dos orientaciones establecen los límites de estos valores. Con la orientación de la configuración magnética, se pueden considerar implementar detalles para el ensamble rotacional.

1.4 Discusión del Estado del Arte del Flujo Magnético

A partir de la información encontrada en la literatura para el análisis de fallas por medio del método de fuga de flujo magnético, es posible aproximar su comportamiento a través del Método del Elemento Finito (MEF). Además que este método es usado ampliamente para el análisis del mayor número de fallas en una tubería. Para llevar a cabo el modelado a través de un programa de simulación se emplean: dimensiones de la falla, medio de excitación para generar el campo magnético y las características de cada uno de éstos.

Varias pruebas que se han empleado en este método muestran configuraciones posibles del imán y ubicaciones del sensado para detectar más apropiadamente la variación del campo magnético, esto dependerá de las dimensiones del ducto.

Con esta información que se ha obtenido y con la ayuda de un programa de simulación, como se verá en el siguiente capítulo, se analizarán la presencia de fallas en la tubería como: corrosión, fugas, grietas e incrustaciones en el ducto a través del MEF. Para finalmente obtener un patrón de comportamiento del campo magnético para cada una de ellas.

Capítulo 2

Análisis de la Distribución del Campo
Magnético en Ductos Ferromagnéticos

2.1 Generalidades del Campo Magnético en Materiales

2.1.1 El Magnetismo en los Materiales

Comenzando con la historia del magnetismo, los griegos eran conscientes de que rocas naturales tenían la propiedad de atraer acero, la palabra magnetismo se deriva de Magnesia un lugar de Grecia donde fueron encontradas las rocas. En el siglo XII un uso práctico del magnetismo, conocido como brújula magnética, fue usado por varias personas para determinar la dirección en el mar. William Gilbert realizó el descubrimiento más importante: que la brújula funciona, porque la Tierra en sí es un gran imán.

No fue hasta el siglo XIX, cuando se estableció la relación entre electricidad y magnetismo. En 1820, Oersted encontró la electricidad en movimiento como una corriente eléctrica, que produce un efecto sobre una aguja magnética el cual parece idéntico al producido por magnetitas naturales. Los resultados de Oersted pronto fueron realizados cuantitativamente por *Biot-Savart*, quien formuló la ley que gobierna la producción de un campo magnético por un alambre recto y largo. Ampere extendió los experimentos y discusiones del campo debido a fuerzas sobre corrientes en alambres de cualquier forma [14].

Los fenómenos magnéticos en las sustancias magnéticas se deben a la existencia de dipolos magnéticos atómicos en el material. Estos dipolos magnéticos son el resultado del movimiento de los electrones en las órbitas atómicas, que equivalen a una espira del “spin” electrónico (movimiento intrínseco del electrón, que puede describirse como un movimiento de giro equivalente del electrón sobre sí mismo) y de los momentos magnéticos de los núcleos atómicos. El efecto del campo exterior es una tendencia a alinear los dipolos magnéticos según su misma dirección y se puede caracterizar el grado de alineación por el momento magnético total por unidad de volumen del material, siendo este momento magnético total la suma vectorial de los momentos individuales. Esta magnitud se denomina magnetización $\mathbf{M}$ del material, y en magnetismo juega un papel equivalente al de la polarización $\mathbf{P}$ en los dieléctricos.

Para demostrar la conexión entre $\mathbf{M}$ y la densidad de corriente solenoidal j_{mag}^S se considera un pequeño cubo que contiene un cierto número de dipolos magnéticos atómicos alineados en la dirección del campo magnético, Figura 2.1.

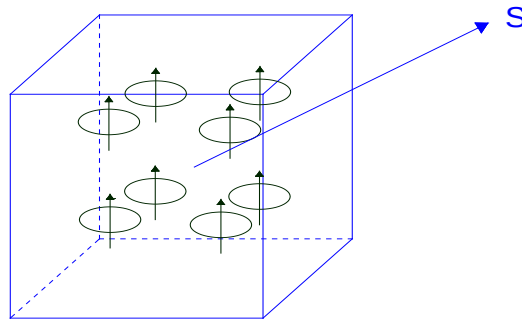


Figura 2.1. Dipolos alineados que representan la magnetización de un pequeño cubo. Estos dipolos dan lugar a un campo magnético en los puntos exteriores tales como S.

Como el momento magnético es una magnitud vectorial; y al calcular el campo de inducción magnética en puntos muy alejados del cubo tales como S se puede decir que el campo S podría estar igualmente producido por una corriente i_{mag} que circula por las caras laterales del cubo como en la Figura 2.2.

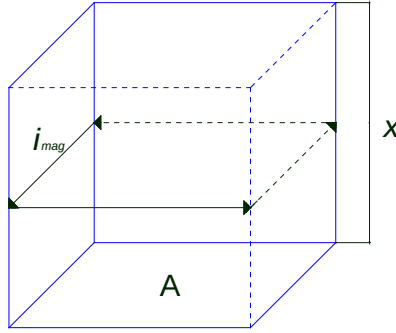


Figura 2.2. El efecto de los polos magnéticos en los puntos exteriores puede simularse mediante una corriente equivalente i_{mag} que circule alrededor de cada elemento de volumen.

Esta corriente actuaría como un dipolo, exactamente como lo hacen los dipolos magnético-atómicos individuales; por tanto, en un punto S alejado del cubo, el campo sería el mismo, como consecuencia de la existencia de dipolos atómicos individuales, también por la existencia de la corriente que rodeará al cubo. El momento magnético del cubo es:

$$p_m = i_{mag}A \quad (2.1)$$

Siendo A el área de la espira, calculando la magnetización M o momento magnético por unidad de volumen del cubo será:

$$M = \frac{i_{mag}A}{xA} = \frac{i_{mag}}{x} = j_{mag}^s \quad (2.2)$$

Donde j_{mag}^s es la densidad de corriente solenoidal equivalente que circula alrededor del cubo. El momento magnético de esta corriente es igual a la suma de los momentos magnéticos de los dipolos atómicos individuales [15].

2.1.2 Definición de Cavity en Campos Magnéticos Vectoriales

Los procedimientos de medición por medio del cual se puede definir los campos vectoriales son: el vector de campo magnético **H** y la inducción del vector **B**. pueden usarse directamente para medirse en vacío, gases y líquidos pero no en sólidos, ya que ni una brújula o prueba de bobina puede moverse libremente dentro de un cuerpo sólido.

La única forma de lograr una medición del campo en un cuerpo sólido, es insertando un dispositivo de medición en un agujero o cavidad en el sólido. Se ha encontrado que la medición se ve afectada por la forma y orientación de la cavidad. Por lo tanto, la forma y orientación de las cavidades pueden ser utilizadas para medir el campo $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ en un medio material. El cuál puede definirse para cualquier medio como:

El vector del campo magnético $\mathbf{H}$ en un punto dentro de un medio material, se define como el vector $\mathbf{H}$ medido en este medio en una pequeña cavidad en forma de aguja, tal que el punto y orientación del campo magnético en la cavidad está en la dirección del eje de la cavidad. La esencia de esta definición está ilustrada en la Figura 2.3. El requisito es que la cavidad esté orientada en la dirección del campo y que sea pequeña para asociar el vector del campo magnético con un punto particular en el medio.

La inducción del vector $\mathbf{B}$ en un punto dentro de un medio material, es definido como el vector $\mathbf{B}$ medido en este medio en una pequeña cavidad en forma de disco tal que el punto y orientación de la inducción del campo en la cavidad está en la dirección del eje de la cavidad. Se ilustra en la Figura 2.4. El requisito es que la cavidad esté orientada a lo largo del eje en la dirección del campo y sea pequeña para asociar la inducción del campo con un punto particular en el medio [16].



Figura 2.3. Medida del campo magnético en un medio material en forma puntual o una cavidad larga cilíndrica.

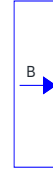


Figura 2.4. Medición de la inducción del campo en un medio material en forma de disco o una corta cavidad cilíndrica.

2.1.3 Leyes Fundamentales del Campo Magnetostático en un Medio-Material

De la ley rotacional (circulación) y la ley de divergencia (flujo) para campos magnetostáticos en un medio material ya que son los mismos para campos magnetostáticos en vacío.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.3)$$

y

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0, \quad \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.4)$$

donde: $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente, $d\mathbf{S}$ una diferencial de superficie y $d\mathbf{l}$ una diferencial de línea.

Para la mayoría de los medios materiales de la relación que existe entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ puede ser expresada por la ecuación siguiente:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (2.5)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad del vacío y μ se define como un factor de proporcionalidad adimensional llamado permeabilidad diferente para cada medio y diferente para puntos en el mismo medio y siempre es dependiente de $\mathbf{H}$ y no es una función de $\mathbf{H}$ también es llamado un medio magnético lineal, la relación entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ es independiente de la dirección de $\mathbf{H}$ y se le llama un medio magnético isotrópico. Frecuentemente μ se puede expresar como:

$$\mu = \chi_m + 1 \quad (2.6)$$

donde χ_m se define como *susceptibilidad magnética*, reduciendo la Ecuación (2.5) para la ley de densidad de flujo en vacío con $\mu = 1$ se obtiene:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.7)$$

Las otras dos leyes fundamentales del campo para un medio material son idénticos con las correspondientes leyes en el vacío, en el caso de un medio material la permeabilidad es $\mu = 1$.

En caso general, un medio nunca es lineal o isotrópico tal que $\mathbf{B}$ no es una función lineal de $\mathbf{H}$ y la relación entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ depende de la dirección relativa de $\mathbf{H}$ y ciertas direcciones características en el medio. Un ejemplo de un medio anisótropico es un cristal. En un cristal la correlación entre $\mathbf{B}$ y $\mathbf{H}$ depende de la dirección relativa de $\mathbf{H}$ en el eje del cristal [16].

Por tanto, se pueden clasificar las sustancias magnéticas de acuerdo con su susceptibilidad χ_m . En las *sustancias paramagnéticas* χ_m positiva y mucho menor que 1. En las sustancias *diamagnéticas* χ_m es negativa y también pequeña comparada con 1. Los *materiales ferromagnéticos* se caracterizan porque χ_m es positiva y muy grande. Sin embargo, en las sustancias ferromagnéticas $\mathbf{M}$ no es exactamente proporcional a $\mathbf{H}$ de modo que χ_m no es una constante, salvo en un pequeño intervalo de valores de $\mathbf{H}$. También se pueden clasificar los materiales magnéticos haciendo uso de la permeabilidad magnética μ . Según su definición, para las distintas sustancias se tiene [15]:

Diamagnéticas: $\mu < \mu_0$

Paramagnéticas: $\mu > \mu_0$

Ferromagnéticas: $\mu \gg \mu_0$

2.1.4 Campo Magnético y Potencial Magnetostática Dentro de un Medio Material

Por el teorema de Poisson's el campo vectorial $\mathbf{H}$ puede ser expresado como:

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'(\nabla' \cdot \mathbf{H}) - \nabla' \times (\nabla' \times \mathbf{H})}{r} dv' \quad (2.8)$$

donde: dv' es una diferencial de volumen y r es la distancia entre los puntos $P(x, y, z)$ y $P'(x', y', z')$ y es dado como $r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$

Por la ley rotacional se tiene $\nabla' \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$. Por la ley de divergencia y ley de densidad de flujo se tiene:

$$\nabla' \cdot \mathbf{H} = \nabla' \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \mu} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \nabla' \cdot \mathbf{B} + \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \nabla' \frac{1}{\mu} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \nabla' \frac{1}{\mu} \quad (2.9)$$

Por lo anterior, la integral del campo magnético se reduce a:

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'[\mathbf{B} \cdot \nabla'(1/\mu)]}{r} dv' + \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.10)$$

Obviamente, esta ecuación no es muy útil para el cálculo de $\mathbf{H}$, ya que para evaluar la primera integral se necesita conocer $\mathbf{B}$, si $\mathbf{B}$ es conocida de la ecuación 2.7 se puede conocer $\mathbf{H}$. Sin embargo para un medio con permeabilidad constante que ocupa todo el espacio $\nabla'(1/\mu) = 0$, la Ecuación (2.10) como:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv \quad (2.11)$$

Esta ecuación es la misma ecuación para $\mathbf{H}$ en vacío. Para un medio material de permeabilidad constante para todo el espacio se tiene:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{r}_u}{r^2} dv' \quad (2.12)$$

donde: $\mathbf{r}_u$ es un vector que se dirige desde el punto de origen x', y', z' al punto de observación x, y, z .

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.13)$$

$$\phi = \frac{I}{4\pi} \Omega \quad (2.14)$$

donde: ϕ es el flujo magnético y Ω es representa el ángulo sólido [16].

2.1.5 Condiciones de Frontera para Campos Magnéticos en una Interface entre Dos Medios.

Si dos medios entran en contacto uno con otro entre ellos existe una zona delgada de transición sobre el cual los valores de los parámetros característicos en el medio cambian poco a poco de valor. Conociendo los valores del parámetro en el medio uno se tendrán los parámetros del medio 2. Esto es frecuente para omitir la existencia de la zona de transición y asumir que el parámetro característico cambia abruptamente sobre la “interfaz” entre el medio.

Para obtener la condición de frontera para $\mathbf{H}$ se construye una pequeña y delgada curva rectangular que cruza la interfaz rectangular entre dos medios 1 y 2 (Figura 2.5.a), aplicando la ley de circulación (Figura 2.5.b) en esta curva se tiene :

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{H}_2 \cdot d\mathbf{l} + \int_b^c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{H}_1 \cdot d\mathbf{l} + \int_d^a \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.15)$$

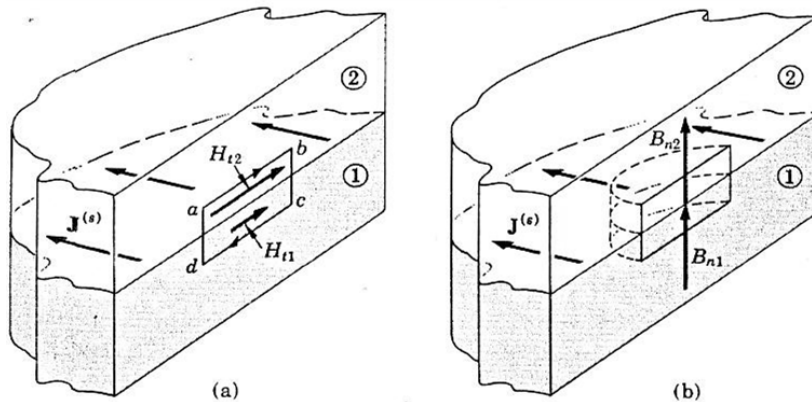


Figura 2.5. (a) Condición de frontera en $\mathbf{H}$ para la interfaz entre dos medios. La componente tangencial de $\mathbf{H}$ es la misma en cada lado de la interfaz si la interfaz no lleva corriente superficial. (b) Condición de frontera para $\mathbf{B}$ en la interfaz entre dos medios. La componente normal de $\mathbf{B}$ es la misma en cada lado de la interfaz [16].

Como la curva es muy estrecha las integrales de línea en los segmentos bc y da desaparecen y debido a que el área sobre la curva es muy pequeña la integral de superficie de la densidad de corriente también desaparece. Sin embargo, es una corriente confinada a la interfaz, en este caso:

$$\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \int_a^b \mathbf{J}^{(s)} \times \mathbf{n}_{12} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.16)$$

donde $\mathbf{J}^{(s)}$ es la densidad de corriente superficial y $\mathbf{n}_{12}$ un vector unitario normal de la interfaz y la dirección del medio 1 dentro del medio 2.es:

$$\int_a^b \mathbf{H}_2 \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{H}_1 \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{J}^{(s)} \times \mathbf{n}_{12} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.17)$$

como la curva es corta se tiene:

$$\mathbf{H}_2 \cdot d\mathbf{l} + \mathbf{H}_1 \cdot (-d\mathbf{l}) = \mathbf{J}^s \times \mathbf{n}_{12} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.18)$$

Remplazando en esta ecuación $d\mathbf{l}$ por $dl\mathbf{t}_u$ donde $\mathbf{t}_u$ es un vector unitario en la dirección de $d\mathbf{l}$ y cancelando $d\mathbf{l}$, finalmente se obtiene:

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{t}_u = \mathbf{J}^s \times \mathbf{n}_{12} \cdot \mathbf{t}_u \quad (2.19)$$

Esta ecuación no requiere que ambos $\mathbf{H}_1$ y $\mathbf{H}_2$ estén en un plano normal a la interfaz, si no hay corriente en la interface la ecuación se reduce a:

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \cdot \mathbf{t}_u = 0 \quad \text{ó} \quad H_{t1} = H_{t2} \quad (2.20)$$

Esto es en el caso particular en que la componente tangencial de $\mathbf{H}$ es continua a través de la interface, para obtener la condición de frontera para $\mathbf{B}$, se construye la superficie Gaussiana pequeña, en una pequeña caja que cruza la interfaz considerada. Aplicando la ley de flujo sobre la superficie se obtiene:

$$(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) \cdot \mathbf{n}_u = 0 \quad \text{ó} \quad B_{t1} = B_{t2} \quad (2.21)$$

donde $\mathbf{n}_u$ es un vector normal a la interface.

Utilizando la analogía entre magnetostática y potencial electrostático se puede transformar las condiciones de frontera para el potencial electrostático, dentro de las condiciones de frontera para el potencial magnetostático en una interfaz de corriente libre se tiene:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (2.22)$$

En un medio lineal isotrópico que implica una interfaz con corriente libre, es frecuente expresar las condiciones de frontera para $\mathbf{B}$ en términos del potencial magnetostático. De $B_n = -\mu_0\mu\partial\varphi/\partial n$, la condición de frontera se puede escribir:

$$\mu_1 \frac{\partial\varphi_1}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial\varphi_2}{\partial n} \quad (2.23)$$

donde n designa una dirección a lo largo de una normal de la interface [16].

2.1.6 Método Especial para la Solución de Problemas Magnetostáticos que Involucran un Medio con μ Constante

El campo magnético en una región con corriente libre puede ser expresado en términos del potencial magnetostático φ como:

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi \quad (2.24)$$

Esta ecuación puede describirse

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot \mu_0\mu\mathbf{H} = -\mu\nabla \cdot (\mu\nabla\varphi) = 0 \quad (2.25)$$

utilizando el vector identidad se obtiene:

$$\nabla^2\varphi + \frac{1}{2}\nabla\mu \cdot \nabla\varphi = 0 \quad (2.26)$$

Si μ es constante y $\nabla\mu = 0$ se obtiene:

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (2.27)$$

El potencial magnetostático en un medio con corriente libre y μ constante satisface la ecuación de Laplace's, justo como el potencial electrostático en un medio con carga libre y ε constante y el potencial del campo eléctrico estacionario en conductores con σ constante.

Existe una analogía entre la magnetostática en donde se tienen problemas que incluyen medios con corriente libre, μ constante y estacionarios. En tanto que para problemas de campo eléctrico incluyen conductores con σ constante, debido a que se tienen leyes similares para ambos casos:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} \quad (2.28)$$

Para problemas magnéticos y para problemas eléctricos se tiene que:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.29)$$

Una diferencia esencial entre estos problemas es que σ puede variar de ∞ a 0, cuando $\mu_0 \mu$ siempre es finito y mayor que 0 [16].

2.1.7 Magnetización y Cargas Magnetizadas.

La teoría del fenómeno magnético en un material como medio, viene dado por dos vectores $\mathbf{H}$ y $\mathbf{B}$ y un tercer vector, el vector de magnetización $\mathbf{M}$ a la cual se define por la ecuación siguiente:

$$\mathbf{M} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.30)$$

Estos vectores son una descripción conveniente para el fenómeno magnético en cualquier medio lineal y no lineal, isotrópico y anisotrópico. Usando el vector de magnetización se pueden derivar formulas importantes para el campo magnetostático asociados con el medio magnetizado (medio con $\mathbf{M} \neq 0$), usando la divergencia para la Ecuación (2.30).

$$\nabla \cdot \mathbf{M} = \nabla \cdot \mathbf{B} - \mu_0 \nabla \cdot \mathbf{H} \quad (2.31)$$

Como $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$, por la ley de divergencia, queda:

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \mathbf{M} \quad (2.32)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.32) y (2.3) dentro de la integral de Poisson's para $\mathbf{H}$ se tiene:

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'(\nabla' \cdot \mathbf{H}) - \nabla' \times (\nabla' \times \mathbf{H})}{r} dv' \quad (2.33)$$

se obtiene:

$$\mathbf{H} = -\frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'(\nabla' \cdot \mathbf{M})}{r} dv' + \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.34)$$

A partir de esta ecuación se derivan formulas importantes como el campo magnetostático $\mathbf{H}$ producido por una distribución de corriente $\mathbf{J}$ en presencia de un medio magnetizante el cual puede ser representada por la suma:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_v + \mathbf{H}_M \quad (2.35)$$

en donde se define para el campo en vacío como:

$$\mathbf{H}_v = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.36)$$

y el campo producido por $\mathbf{J}$ en la ausencia de un medio la magnetización del campo es:

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'(\nabla' \cdot \mathbf{M})}{r} dv' \quad (2.37)$$

El cual está asociado con el medio. Representando el campo electrostático $\mathbf{E}$ asociado con la distribución de carga ρ se tiene:

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \rho}{r} dv' \quad (2.38)$$

El cálculo de $\mathbf{H}$ en un medio magnetizado es equivalente a cierta distribución de “carga magnética” la cual produce el campo $\mathbf{H}_M$ si el medio fuera remplazado por esta distribución de carga. Esta distribución de carga ficticia se llama distribución de carga magnética y es definida como:

$$\rho_M = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (2.39)$$

Por lo tanto, el campo magnetizado puede ser expresado como:

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \rho_M}{r} dv' \quad (2.40)$$

Esta ecuación puede ser transformada en una forma más conveniente de la forma:

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r^2} dv' \quad (2.41)$$

Para un medio magnetizante o medida finita se puede explicar dentro de tres integrales: una sobre el volumen interior del medio, otra sobre la capa límite del medio y una sobre el espacio externo como la ecuación siguiente:

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Interior}} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r^2} dv' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Capa límite}} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r^2} dv' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Espacio exterior}} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r^2} dv' \quad (2.42)$$

Como fuera del medio, $\mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} - \mu_0 \mathbf{H} = 0$, tal que $\rho_M = \nabla \cdot \mathbf{M} = 0$ y la ecuación (2.42) se reduce a:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_M = & \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Interior}} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r^2} dv' - \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{\text{Capa límite}} \frac{\mathbf{r}_u}{r^2} (\mathbf{M} \cdot d\mathbf{S}') \\ & + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Capa límite}} (\mathbf{M} \cdot \nabla') \frac{\mathbf{r}_u}{r^2} dv' \end{aligned} \quad (2.43)$$

El volumen de la capa límite se puede asumir tan pequeño como se quiera y puesto que $\mathbf{M}$ es finito, la última ecuación de la integral desaparece, sustituyendo $d\mathbf{S}'$ por $\mathbf{n}_{in}d\mathbf{S}'$, donde $\mathbf{n}_{in}$ es un vector unitario en dirección interna a la normal de la superficie del medio se obtiene la última ecuación:

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{Interior} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r} dv' - \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{Superficie} \left(\frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{n}_{in}}{r^2} \right) \mathbf{r}_u dS' \quad (2.44)$$

Este campo magnetizado puede ser atribuido a una distribución volumétrica de la carga de magnetización:

$$\rho_M = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (2.44)$$

Si se propaga en el interior de un medio y se distribuye en la superficie la carga magnética se define como:

$$\sigma_M = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{n}_{in} \quad (2.45)$$

Como se propaga por el medio $\mathbf{H}_M$ se puede escribir de la forma

$$\mathbf{H}_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{Interior} \frac{\rho_M \mathbf{r}_u}{r} dv' - \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{Superficie} \frac{\sigma_M \mathbf{r}_u}{r^2} dS' \quad (2.46)$$

La rotacional del campo magnetizado siempre es cero y como la rotacional del campo magnetostático total está dado por la ecuación siguiente:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H}_V + \nabla \times \mathbf{H}_M \quad (2.47)$$

Por las leyes se tiene que $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ y $\nabla \times \mathbf{H}_V = \mathbf{J}$ y como $\nabla \times \mathbf{H} = 0$, la divergencia del campo magnetizado se puede escribir como:

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_M = \nabla \cdot \mathbf{H} + \nabla \cdot \mathbf{H}_V \quad (2.48)$$

Donde $\nabla \cdot \mathbf{H}_V = 0$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \mathbf{M} = \frac{\rho_M}{\mu_0} \quad (2.49)$$

y por último:

$$\nabla \cdot \mathbf{H}_M = \frac{\rho_M}{\mu_0} \quad (2.50)$$

Por el teorema de Poisson's, el campo magnetizado es derivable y por el potencial magnética escalar se tiene:

$$\mathbf{H}_M = -\nabla \varphi_M \quad (2.51)$$

donde

$$\varphi_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\rho_M}{r} dv' \quad (2.52)$$

o

$$\varphi_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Interior}} \frac{\rho_M}{r} dv' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \oint_{\text{Superficie}} \frac{\sigma_M}{r^2} dS' \quad (2.53)$$

De la ecuación (2.52) el potencial magnético puede ser transformado a la siguiente ecuación:

$$\varphi_M = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{\text{Todo el espacio}} \mathbf{M} \cdot \nabla' \frac{1}{r} dv' \quad (2.54)$$

Interpretando que se produce una “magnetización” ficticia del momento dipolar $dm = Mdv'$ la magnetización del vector $\mathbf{M}$ puede, por lo tanto, interpretarse como un momento dipolar, tal que la magnetización dipolar es:

$$\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{m}}{dv} \quad (2.55)$$

El potencial φ_M puede ser considerado como el potencial producido por todos estos dipolos propagados a través del medio magnetizado. Esta representación de un medio magnetizado es equivalente a la distribución de carga, en especial al tratar con imanes o materiales que poseen magnetización permanente [16].

2.1.8 Corrientes Magnéticas

En el caso del cálculo del campo magnético en un medio magnetizado se puede remplazar por cargas magnéticas ficticias entonces en el cálculo de la inducción magnética en un medio magnetizado, puede ser remplazada por *corrientes de magnetización* ficticias. De la ley rotacional aplicada a la Ecuación 2.28 se tiene:

$$\nabla \times \mathbf{M} = \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \nabla \times \mathbf{H} \quad (2.56)$$

Aplicando la ley rotacional en $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ se tiene:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{M} + \mu_0 \mathbf{J} \quad (2.57)$$

Sustituyendo esta ecuación y la ecuación de divergencia dentro de la integral de Poisson's para $\mathbf{B}$ se tiene:

$$\mathbf{B} = -\frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla'(\nabla' \cdot \mathbf{B}) - \nabla' \times (\nabla' \times \mathbf{B})}{r} dv' \quad (2.58)$$

Obteniéndose:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times (\nabla' \times \mathbf{M})}{r} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.59)$$

En la Ecuación (2.59) se puede ver la inducción del campo $\mathbf{B}$ producida por una distribución de corriente $\mathbf{J}$ en la presencia de un medio magnetizado que puede considerarse como la suma:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_V + \mathbf{B}_M \quad (2.60)$$

de los dos campos parciales: el campo ordinario en vacío:

$$\mathbf{B}_V = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}}{r} dv' \quad (2.61)$$

El cual indica el campo producido por $\mathbf{J}$ en la ausencia de un medio, y la magnetización del campo queda como:

$$\mathbf{B}_M = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times (\nabla' \times \mathbf{M})}{r} dv' \quad (2.62)$$

Esta ecuación está asociada con el medio, por comparación de las dos últimas ecuaciones para el cálculo de $\mathbf{B}$ se refiere a un medio magnetizado y es equivalente a una cierta “corriente de magnetización” distribuida, el cual produce en el medio el campo $\mathbf{B}_M$; el cual es remplazado por la distribución de corriente. La distribución de corriente ficticia esta dada por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{J}_M = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{M} \quad (2.63)$$

El campo magnetizado puede ser expresado como:

$$\mathbf{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\nabla' \times \mathbf{J}_M}{r} dv' \quad (2.64)$$

Esta ecuación puede ser transformada en una forma más conveniente para utilizar la ecuación original. Una forma es:

$$\mathbf{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\mathbf{J}_M \times \mathbf{r}_u}{r^2} dv' \quad (2.65)$$

Normalmente se trata con medios magnetizados de extensión finita, para un medio de este tipo la Ecuación (2.65) se puede transformar después de manipular en:

$$\mathbf{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Interior}} \frac{\mathbf{J}_M \times \mathbf{r}_u}{r^2} dv' + \frac{1}{4\pi} \oint_{\text{Superficie}} \frac{(\mathbf{M} \times \mathbf{n}_{out}) \times \mathbf{r}_u}{r^2} dS' \quad (2.66)$$

Donde $\mathbf{n}_{out}$ es un vector unitario paralelo a dS' , esta ecuación expresa el medio magnetizado de una extensión finita de la magnetización del campo, la cual puede ser atribuido a la distribución volumétrica de la corriente de magnetización

$$\mathbf{J}_M = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{M} \quad (2.67)$$

Propagándose en el interior del medio, la distribución superficial de la corriente de magnetización se define como:

$$\mathbf{J}_M^{(s)} = -\frac{1}{\mu_0} \mathbf{M} \times \mathbf{n}_{out} \quad (2.68)$$

propagándose sobre la superficie de un medio, para tal medio se puede escribir mediante la ecuación siguiente:

$$\mathbf{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{Interior} \frac{\mathbf{J}_M \times \mathbf{r}_u}{r^2} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{Superficie} \frac{\mathbf{J}_M^{(s)} \times \mathbf{r}_u}{r^2} dS' \quad (2.69)$$

La divergencia para la inducción de campo magnético siempre es cero, de esto se tiene:

$$\nabla \cdot \mathbf{B}_M = \nabla \cdot \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{B}_V = 0 - 0 \quad (2.70)$$

Por lo tanto:

$$\nabla \cdot \mathbf{B}_M = 0 \quad (2.71)$$

De la rotacional del campo de inducción magnética es:

$$\nabla \times \mathbf{B}_M = \nabla \times \mathbf{B} + \nabla \times \mathbf{B}_V \quad (2.72)$$

Simplificando los términos se tiene:

$$\nabla \times \mathbf{B}_M = \mu_0 \mathbf{J}_M \quad (2.73)$$

Del teorema de Poisson's, el campo de magnetización es derivable entonces el *vector de magnetización potencial* es:

$$\mathbf{B}_M = \nabla \times \mathbf{A}_M \quad (2.74)$$

Donde:

$$\mathbf{A}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{Todo el espacio}} \frac{\mathbf{J}_M}{r} dv' \quad (2.75)$$

La Ecuación (2.75) constituye una importante enlace de conexión de la teoría macroscópica del fenómeno magnético con la teoría microscópica. La corriente de magnetización ficticia de la teoría macroscópica en la teoría microscópica es una manifestación de la rotación y en la orbita partículas cargadas dentro del átomo y sistema molecular [16].

2.2 Análisis del Campo Magnético en Ductos

Para el comportamiento del campo magnético, este se puede aproximar mediante dos métodos que pueden ser a través de una aproximación por líneas de transmisión y otra propuesta es analizándolo como un transformador.

2.2.1 Aproximación por Líneas de Transmisión [17]

Los métodos electromagnéticos superficiales tienen una amplia gama de aplicaciones en diversas áreas técnicas como son: protección ambiental, ingeniería física, ingeniería civil e inspección en ductos. En esta última, es imprescindible dar solución a problemas que incluyen la determinación de la posición, trayectoria y perfiles de las redes de las tuberías, la identificación y delimitación de zonas con cambios en su aislamiento, así como la evaluación del funcionamiento de los sistemas de protección catódica la cual depende de la resistencia de la fuga determinada por la resistencia de aislamiento y la resistividad de las formaciones donde está ubicada la tubería.

La base de la metodología electromagnética la constituyen las mediciones del campo magnético producido por una corriente que fluye en la tubería donde el comportamiento del campo sobre la tubería permite determinar la posición y la profundidad del ducto subterráneo; y la variación de su valor máximo a lo largo del ducto proporciona información sobre el funcionamiento del sistema de protección catódica y el estado de su aislamiento.

En términos generales, se pueden mencionar dos sistemas de protección catódica: electrodos de sacrificio y sistemas con estaciones eléctricas que usan rectificadores en las cuales se rectifican frecuencias industriales, en este sistema además de corriente directa se produce una corriente alterna que corresponde a la segunda armónica con una frecuencia de 120 Hz.

Las mediciones en frecuencias infrabajas (CD) tienen dificultades técnicas de medición con antenas magnéticas inducidas y requieren el uso de magnetómetros de tipo flux gate. Para evitar estos problemas de medición del campo magnético se usa la segunda armónica de corriente o se aplican generadores externos con frecuencias bajas (100-1000Hz).

La metodología de la inspección de ductos por medio de los métodos electromagnéticos superficiales, técnicas de mediciones experimentales e interpretación cualitativa de datos fue considerada en (Shevnin, Modin, 1999). La aplicación de las líneas de transmisión para aproximación de tuberías metálicas en frecuencias bajas y el modelado e interpretación cuantitativo del campo magnético sobre ductos fue presentado en (Mousatov, Nakamura, 2001).

La teoría de líneas de transmisión ha sido utilizada en estudios con métodos electromagnéticos entre los cuales se pueden mencionar: determinación de la resistividad de formación en pozos entubados (Kaufman, 1990,1993), estimación de corrientes de protección catódica (Morgan, 1993) y detección de zonas de aislamiento dañado en ductos para corriente directa (CD) (Mousatov, Nakamura, 2001).

La aproximación de la tubería metálica mediante un sistema de parámetros distribuidos (líneas de transmisión) para señales de corriente alterna en rango de frecuencias bajas, debido a que en el sistema de protección catódica se utilizan rectificadores de corriente alterna de 60 Hz los cuales producen una señal de 120 Hz que corresponde a la segunda armónica de la corriente industrial. El modelo equivalente se muestra en la Figura 2.6.

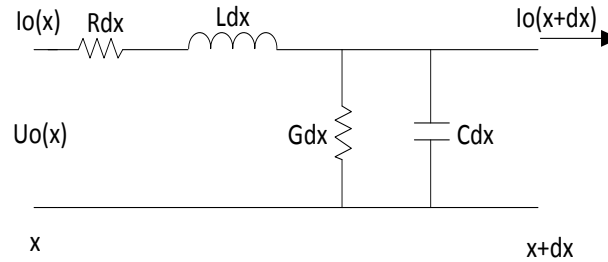


Figura 2.6. Modelo equivalente de una tubería como línea de transmisión para corriente alterna.

Suponiendo que el generador de voltaje armónico $U(0)$ en el rango de baja frecuencia es conectado al inicio de la tubería, cuyo punto representa el origen de las coordenadas con el eje x dirigido a lo largo de la tubería metálica.

El cambio de la corriente $dI(x)$ en el intervalo dx es expresado utilizando la ley de Ohm como:

$$\frac{dI(x)}{dx} = -YU(x) \quad (2.76)$$

y el potencial $dU(x)$ está dado por:

$$\frac{dU(x)}{dx} = -ZI(x) \quad (2.77)$$

La admitancia en paralelo Y y la impedancia en serie Z por unidad de longitud se expresa a través de los parámetros distribuidos como la resistencia R y la inductancia L de tubería, asimismo la conductancia G y la capacitancia C de fugas.

$$\begin{aligned} Y &= G + j\omega C \\ Z &= R + j\omega L \end{aligned} \quad (2.78)$$

Tomando en cuenta que se consideran frecuencias de operación bajas, se pueden despreciar la influencia de la capacitancia y suponer que la impedancia se define solamente por la conductancia G de la fuga.

Derivando las expresiones de las ecuaciones 2.76 y 2.77 se obtienen las ecuaciones para corriente y voltaje

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} = -\gamma^2 I(x) \quad (2.79)$$

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} = -\gamma^2 U(x) \quad (2.80)$$

donde $\gamma = \sqrt{ZY}$ es el parámetro de propagación.

La solución (2.79) y (2.80) tienen la forma

$$U(x) = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} \quad (2.81)$$

$$I(x) = C \frac{\gamma}{Z} e^{-\gamma x} + D \frac{\gamma}{Z} e^{\gamma x} \quad (2.82)$$

La corriente $I(x)$ que fluye a lo largo de la tubería (línea de transmisión) produce el campo magnético primario que se define por la ley de Biot-Savart. La componente horizontal del campo magnético H_y , (perpendicular al eje de la tubería), en la superficie en el punto $y=0$ puede ser presentado como:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x_p) h dx_p}{[h^2 + (x - x_p)^2]^{3/2}} \quad (2.83)$$

donde h es la profundidad del ducto y x el punto de medición.

Pasando a la integración en el intervalo finito (el cual para la exactitud requerida en la práctica de mediciones es mucho menor que el parámetro de propagación) y tomando en cuenta que la corriente varía linealmente con respecto a la ecuación (2.82) se simplifica como:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I(x)}{2\pi h} \quad (2.84)$$

En este caso el campo magnético está relacionado con la corriente en el punto de medición x . Para la componente horizontal en el perfil perpendicular al eje del ducto se obtiene:

$$H_y(x, 0, h) = \frac{I(x)h}{2\pi(y^2 + h^2)} \quad (2.85)$$

La derivada del campo magnético permite determinar el cambio de la corriente a lo largo de la tubería. Este cambio corresponde a la corriente de fuga. La relación entre el potencial $U(x)$ y la diferencia de corriente $\Delta I(x)$ (determinada por diferencia de campo magnético) corresponde al valor de la resistencia de fuga (resistencia de aislamiento).

2.2.2 Análisis del Ducto Como Transformador

Para analizar el comportamiento del campo magnético en el interior del ducto, se propone considerar una equivalencia a la configuración del circuito magnético de un transformador, Figura 2.7.

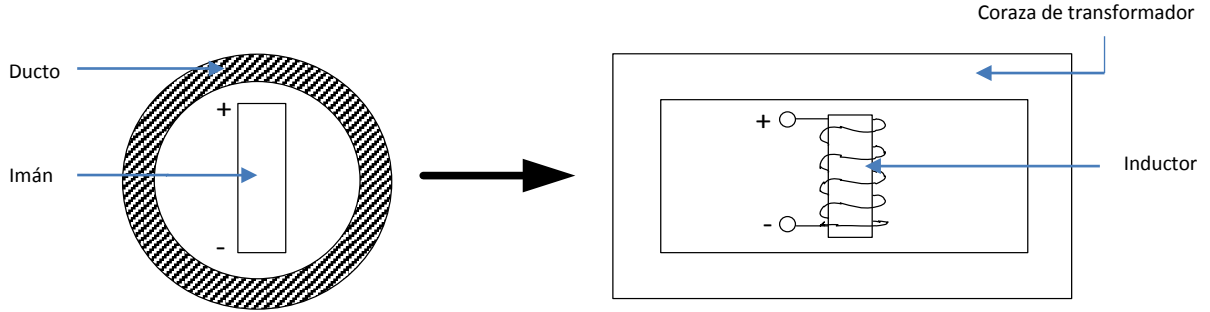


Figura 2.7. Equivalencia propuesta del ducto-imán con el de un transformador.

Para el análisis propuesto se considera representar el fenómeno magnético mediante el circuito magnético, Figura 2.8, que permita mostrar la distribución y el cálculo del flujo magnético ϕ en el ducto y en la región de sensado.

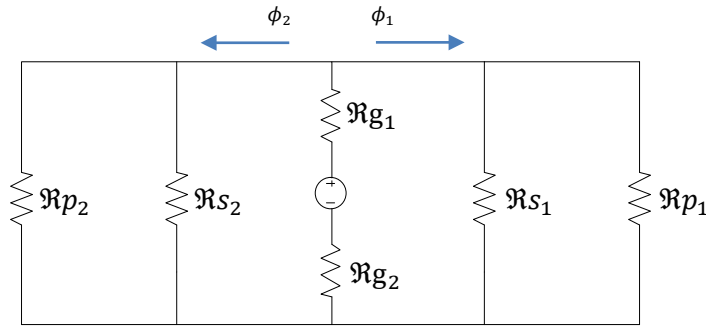


Figura 2.8. Configuración eléctrica del ducto.

Donde:

$\mathcal{R}_{g1} = \mathcal{R}_{g2}$ = es la reluctancia, de la separación entre el imán y del ducto (gap).

$\mathcal{R}_{s1} = \mathcal{R}_{s2}$ = es la reluctancia del sensado en la región del aire.

$\mathcal{R}_{p1} = \mathcal{R}_{p2}$ = es la reluctancia del ducto o material ferromagnético.

Para el cálculo de la reluctancia del ducto, Figura 2.9, el análisis se delimita a la región 0.

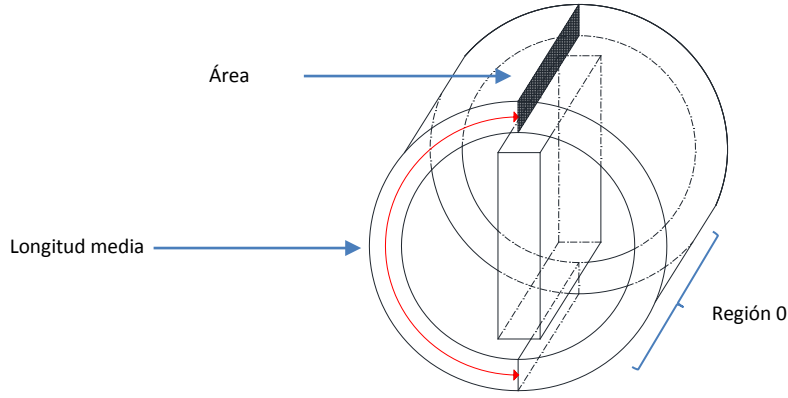


Figura 2.9. Región del imán.

En esta zona se calcula la reluctancia $\mathfrak{R}_{D(circunferencial)}$ mediante la Ecuación (2.86).

$$\mathfrak{R}_{D(circunferencial)} = \frac{\ell_m}{\mu_0 \mu_r A_D} \quad (2.86)$$

Donde:

ℓ_m : Es la longitud media del ducto.

A_D : Es el área transversal del ducto.

μ_0 : Es la permeabilidad del vacío $4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}$

μ_r : Es la permeabilidad del ducto

Posteriormente, para esta misma zona se calcula la reluctancia contenida en el aire $\mathfrak{R}_{S(circunferencial)}$ mediante un área imaginaria que se toma, Figura 2.10, la cual es representada por puntos aleatorios.

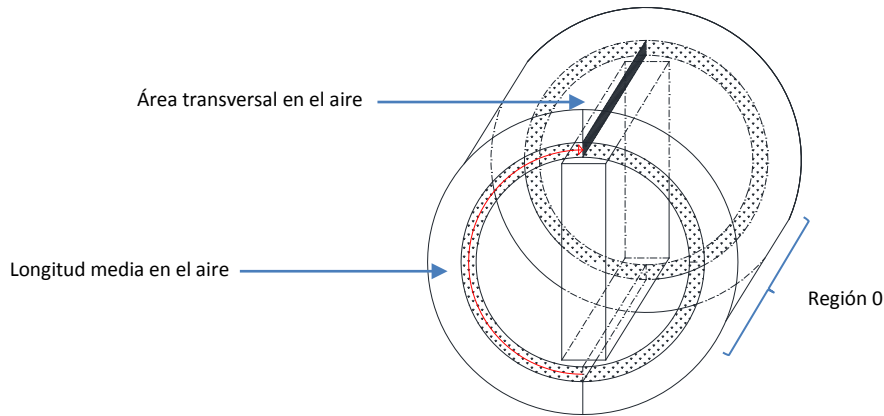


Figura 2.10. Región del área imaginaria en el aire en la zona del imán.

Para la zona en el aire la reluctancia $\mathfrak{R}_{S(circunferencial)}$ se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$\mathfrak{R}_{S(circunferencial)} = \frac{\ell_{m(aire)}}{\mu_0 \mu_r A_S}, \quad (2.87)$$

donde:

$\ell_{m(aire)}$: Es la longitud media del aire.

A_S : Es el área transversal del aire.

μ_r : Es la permeabilidad del aire.

Ya obtenidas las reluctancias del ducto y del aire, se aplican las siguientes ecuaciones para obtener el campo magnético y el flujo total que circula sobre el imán:

$$B_T = \mu_0 \mu_r H \quad (2.88)$$

$$\phi_T = B_T A_{imán} \quad (2.89)$$

Resolviendo la configuración eléctrica de la Figura 2.8, para la *región 0* se obtiene que:

$$\phi_1 = \frac{\mathfrak{R}_{eq2} \phi_T}{\mathfrak{R}_{eq1} + \mathfrak{R}_{eq2}} \quad (2.90)$$

y

$$\phi_2 = \frac{\mathfrak{R}_{eq1} \phi_T}{\mathfrak{R}_{eq1} + \mathfrak{R}_{eq2}} \quad (2.91)$$

donde:

$$\mathfrak{R}_{eq1} = \mathfrak{R}_{eq2} = \left(\frac{1}{\mathfrak{R}_{D(circunferencial)}} + \frac{1}{\mathfrak{R}_{S(circunferencial)}} \right)^{-1}$$

Posteriormente se calcula la Fuerza magnetomotriz para obtener el flujo magnético en el ducto y en la región del sensado:

$$\mathcal{F} = \phi_1 \mathfrak{R}_{eq1} = \phi_2 \mathfrak{R}_{eq2} \quad (2.92)$$

$$\phi_{D(circunferencial)} = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}_{D(circunferencial)}}, \quad (2.93)$$

$$\phi_{S(circunferencial)} = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}_{S(circunferencial)}}. \quad (2.94)$$

Para regiones más alejadas del imán se propone analizar el comportamiento del campo magnético mediante una reluctancia $\mathfrak{R}_{p_n}$, donde n varía según el posicionamiento de la región que se analice. Como las líneas de campo no sólo se distribuyen en la región del imán si no también a lo largo del ducto. Se pretende aproximar el comportamiento del flujo magnético ϕ en todo el ducto. El circuito equivalente para este análisis se muestra en la Figura 2.11.

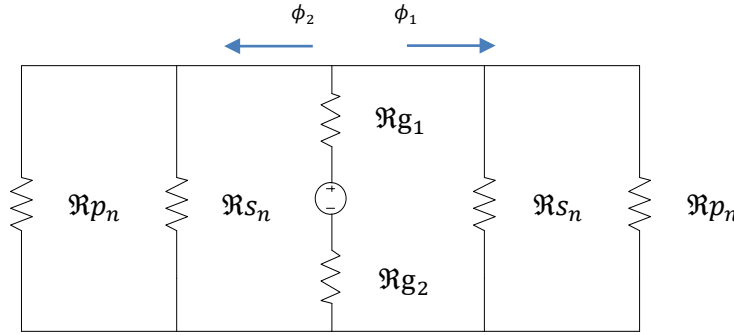


Figura 2.11. Configuración eléctrica a lo largo del ducto.

Donde:

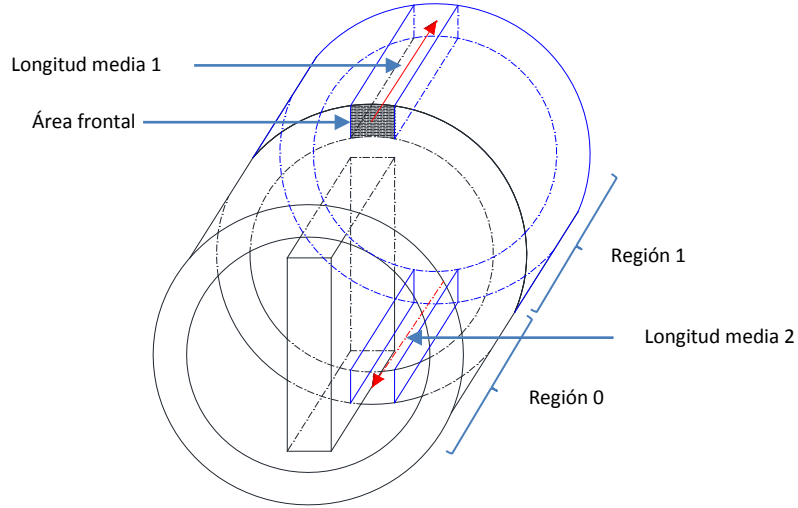
$\mathfrak{R}_{g_1} = \mathfrak{R}_{g_2}$ = es la reluctancia, de la separación entre el imán y del ducto (gap).

$\mathfrak{R}_{s_n} = \mathfrak{R}_{s_n}$ = es la reluctancia del sensado en la región del aire y n varía según la región axial que se esté analizando.

$\mathfrak{R}_{p_n} = \mathfrak{R}_{p_n}$ = es la reluctancia del ducto o material ferromagnético y n varía según la región axial que se esté analizando.

.

En la Figura 2.12 se muestra la *región 1* a una posición axial del ducto.


 Figura 2.12. *Región 1* del ducto.

En esta posición axial se muestra con líneas rojas la trayectoria del flujo a lo largo del ducto en la primera región, estas líneas representan una línea en una dirección y otra contraria, por ello, para el cálculo de la longitud media se considera el doble. La $\mathfrak{R}p_n$ propuesta es la siguiente:

$$\mathfrak{R}p_n = \mathfrak{R}_{D(circunferencial)} + \mathfrak{R}_{D(axial)}, \quad (2.95)$$

donde:

$\mathfrak{R}_{D(circunferencial)}$: Es la reluctancia calculada por la Ecuación (2.86)

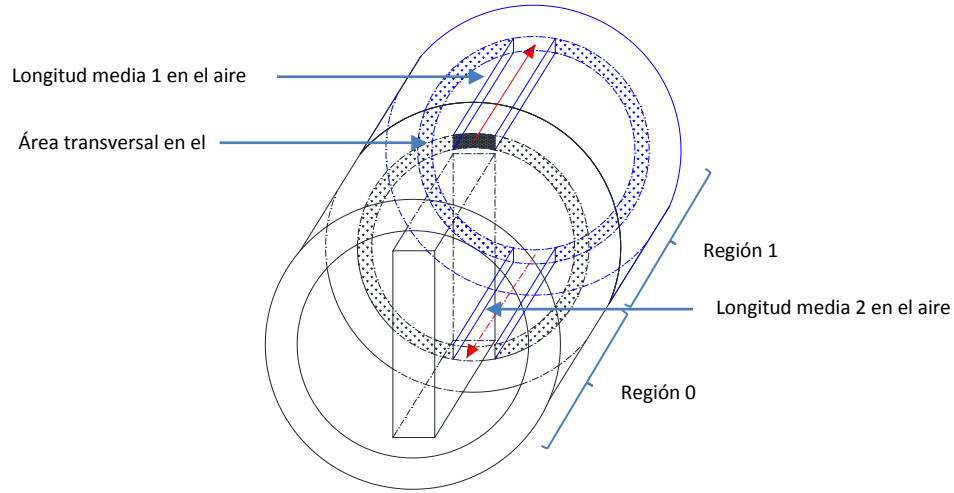
$\mathfrak{R}_{D(axial)}$: Es la reluctancia en las regiones y se define como:

$$\mathfrak{R}_{D(axial)} = \frac{2n\ell_{m(aire)}}{\mu_0\mu_r A_{Df}} \quad (2.96)$$

En este caso A_{Df} representa el área frontal en el ducto y n varía según la región. Finalmente el cálculo del Flujo a lo largo del ducto queda:

$$\phi_{Dn} = \phi_{D(circunferencial)} \left(\frac{\mathfrak{R}_{D(circunferencial)}}{\mathfrak{R}p_n} \right) \quad (2.97)$$

Para el caso de la zona del sensado a lo largo del ducto, y tomando esta misma consideración en la Figura 2.13, se ilustra un área imaginaria para el cálculo de la reactancia en la *región 1*.


 Figura 2.13. *Región 1* en la zona del sensado.

La ecuación que aproxima su comportamiento es la siguiente:

$$\Re_{S_n} = \Re_{S(circunferencial)} + \Re_{S(axial)}, \quad (2.98)$$

donde:

$\Re_{S(circunferencial)}$: Es la reluctancia calculada por la Ecuación 2.87

$\Re_{S(axial)}$: Es la reluctancia en las regiones y se define como:

$$\Re_{S(axial)} = \frac{2n\ell_{m(aire)}}{\mu_0\mu_r A_{Sf}}, \quad (2.99)$$

donde A_{Sf} representa el área frontal en el sensor y n varía según la región.

El flujo aproximado en la región del sensado a lo largo del ducto se define como sigue:

$$\phi_{S_n} = \phi_{S(circunferencial)} \left(\frac{\Re_{S(circunferencial)}}{\Re_{S_n}} \right). \quad (2.100)$$

Los cálculos realizados anteriormente son sólo para condiciones nominales del ducto. En dado caso que se deseará aproximar las fallas mediante el flujo magnético, estas se podrían considerar como reluctancias

que variarían según el tamaño de la falla. Una falla pequeña implicaría una reluctancia muy grande y una falla grande implicaría una reluctancia pequeña, teniendo una mayor exactitud en la región del imán y zonas muy cercanas a esta.

Capítulo 3

Análisis Numérico (MEF) de la
Distribución de Campo Magnético en
Ductos Ferromagnéticos

3.1 Generalidades del MEF

Muchos problemas en Ingeniería son extremadamente difíciles o imposibles de solucionar por métodos analíticos convencionales, tanto que estos métodos incluyen encontrar ecuaciones matemáticas con el cual definir variables necesarias. Por ejemplo, en la distribución de fuerzas y desplazamientos en un componente sólido o presión y velocidades en el flujo de un fluido. En el pasado la práctica más común era simplificar el problema a un punto específico, donde se podría obtener una solución analítica el cual se esperaba que tuviera cierta semejanza a la solución del problema real. Con los recientes avances de la alta velocidad en la electrónica digital de equipos de cómputo, el énfasis del análisis ingenieril se ha movido versátilmente a través de métodos numéricos; una clase semejante de estos métodos se ha dado el nombre de Método del Elemento Finito (MEF).

El método del elemento se originó para el análisis en el campo estructural y fue ampliamente desarrollado y explotado en la industria aeroespacial durante los años 50's y 60's. El Método del Elemento Finito ha sido usado extensamente por Ingeniería mecánica, particularmente para el análisis de fuerzas en componentes sólidos. Su éxito ha sido tal que métodos experimentales incluyen revestimientos frágiles, medición de tensión o efectos fotoelásticos que en cierto puntos son obsoletos, problemas en mecánica de fluidos y transferencia de calor.

Todo el Método del Elemento Finito incluye la división del sistema físico como estructuras sólidas o fluidos continuos dentro de pequeñas subregiones o elementos, cada elemento es una unidad esencial simple y el comportamiento puede ser fácilmente analizado. La complejidad de todo el sistema se puede acomodar por números de elementos más grades en lugar de muchas soluciones analíticas por sofisticadas matemáticas. Una de las atracciones del Método del Elemento Finito es la facilidad con que se puede aplicar a problemas que incluyen sistemas geométricos complicados. El precio que se debe de pagar para la flexibilidad y simplificación de elementos individuales, es la cantidad de computación numérica requerida y el de muy grandes conjuntos de ecuaciones algébricas simultáneas que se tiene que resolver el cual sólo puede hacerse con la ayuda económica de tiempo con ordenadores digitales. Afortunadamente el Método del Elemento Finito puede ser programado fácilmente para este propósito [18].

El Método del Elemento Finito es un procedimiento numérico que puede ser aplicado para obtener soluciones a una variedad de problemas de ingeniería como: estable, transiente, lineal o no lineal, problemas de análisis de esfuerzos, transferencia de calor, flujo de fluidos y problemas de electromagnetismo que pueden ser analizados con el Método del Elemento Finito, el origen del MEF moderno se remonta a principios de 1900's, cuando algunos investigadores aproximaron y modelaron la elasticidad continua usando discretización de barras elásticas equivalentes. Sin embargo, Courant (1943) se le acredita como la primera persona que desarrolló el Método del Elemento Finito, ya que usó la interpolación polinomial en tramos sobre subregiones triangulares para investigar problemas de torsión.

El siguiente paso del Método del Elemento Finito fue tomado por Boeing en 1950, cuando seguido por otros, usó esfuerzos en elementos triangulares para modelar las alas de un avión. No fue hasta 1960

cuando investigadores aplicaron el método del elemento finito en otras áreas de la ingeniería como transferencia de calor y problemas de filtración de flujo. En 1971 ANSYS fue publicado por primera vez.

ANSYS es un programa computacional del método del elemento finito integral y de propósito general que contiene más de 100,000 líneas de código, ANSYS es capaz de realizar estática, dinámica, transferencia de calor, flujo de fluidos y análisis electromagnético. Hoy en día ANSYS se usa en muchos campos de ingeniería incluyendo, aeroespacial, automotriz, electrónica y nuclear. ANSYS es una herramienta ingenieril poderosa e impresionante que puede ser usada para solucionar una variedad de problemas

Los pasos básicos que incluyen cualquier análisis dentro del elemento finito consiste en lo siguiente:

Fase de reprocesado

1. Crear y discretizar el dominio de solución dentro del elemento finito, esto es subdividir el problema en nodos y elementos.
2. Adoptar una forma de la función que represente el comportamiento físico de un elemento, que es aproximar por una función continua, asumiendo que representa la solución de un elemento.
3. Desarrollar ecuaciones por elemento.
4. Ensamblar los elementos que representan el problema completo y construir la matriz global de rigidez.
5. Aplicar condiciones de frontera, condiciones iniciales y cargas.

Fase de solución

6. Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas lineales o no lineales para obtener resultados nodales como valores de desplazamiento, temperatura en diferentes nodos y problemas de transferencia de calor.

Fase de postprocesado

7. Obtener otra importante información, en este punto se puede interesar en los valores de esfuerzos principales, flujo de calor etc.

En general hay muchas aproximaciones para formular el problema del método del elemento finito: (1) Formulación directa, (2) Formulación mínima de la energía potencial total, (3) Formulación por residuos ponderados, estos son pasos básicos que involucran cualquier análisis por elemento finito [19].

3.2 Modelo MEF

El análisis del campo magnético $\mathbf{H}$ por el Método del Elemento Finito, se llevó a cabo con la ayuda de una herramienta de simulación en el software ANSYS 11, ya que a través de este programa se pueden llevar a cabo problemas relacionados con estática, dinámica, transferencia de calor, flujo de fluidos y análisis electromagnético. Con respecto a este último que contiene las herramientas necesaria para llevar a cabo el análisis y modelado de $\mathbf{H}$ en el ducto ferromagnético, se trabajó sobre esta sección bajo condiciones particulares y para modelar el imán en el interior del ducto ferromagnético y denotar el comportamiento de $\mathbf{H}$ mediante histogramas tanto para condiciones normales y de falla, a través de variaciones geométricas en el ducto para emular diversas condiciones de falla, que en este caso se están considerando *corrosión, fugas, grietas e incrustaciones en el ducto*.

Para analizar el comportamiento de $\mathbf{H}$ en el ducto ferromagnético, se inició con un análisis en 2D (2 dimensiones) para caracterizar el comportamiento del campo magnético sobre la región del imán en la Figura 3.1 se muestra la distribución del campo magnético del imán, este análisis se llevó a cabo en condiciones normales y para condiciones de falla. La barra magnética del imán considerada para la simulación es de neodimium hierro-boro el cual produce una energía de 35 MGOe (Megagauss Oersted), es equivalente a una fuerza coercitiva o magnetización del imán de 868000 A/m [Apéndice B-1] y una permeabilidad considerada de 1.2 [Apéndice B-2]. Para el ducto se considera una permeabilidad 2000.

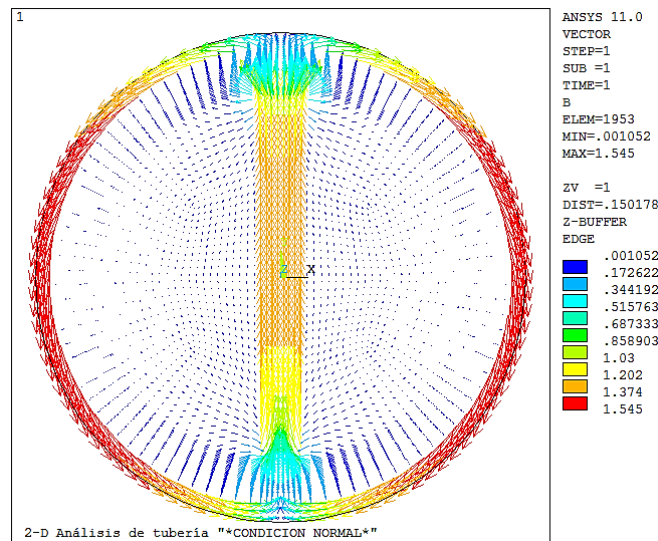
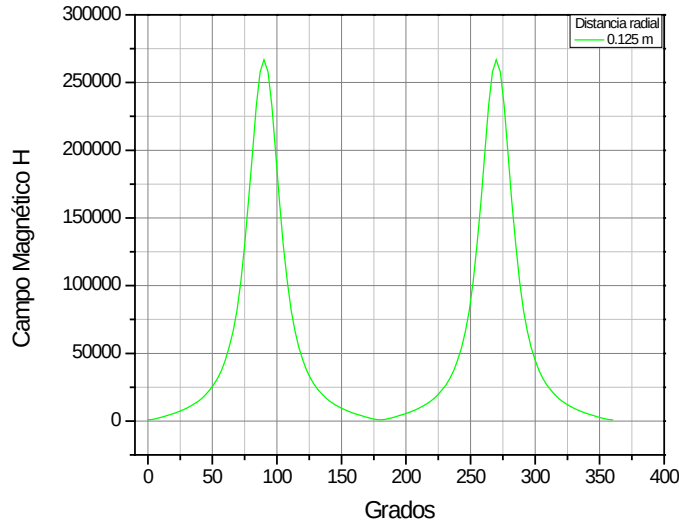


Figura 3.1. Comportamiento de $\mathbf{H}$ en 2D.

Al analizar ciertas condiciones de falla era difícil denotar la presencia del defecto en el histograma puesto que el comportamiento del campo magnético se veía afectada mayormente por el efecto de los polos (norte-sur) ubicados a 90° y 270° como se aprecia en la Figura 3.2, se optó por analizar el comportamiento a una posición más alejada para reducir el efecto de los polos y obtener un comportamiento con mayor uniformidad del campo magnético donde se puedan apreciar las variaciones debido a las defectos.


 Figura 3.2. Gráfica del comportamiento de $\mathbf{H}$ en 2D.

Para llevar a cabo el análisis del comportamiento del campo magnético $\mathbf{H}$ a una posición más alejada del imán se trabajó en un modelado 3D. En este modelado se incluyeron las propiedades del imán, el ducto y condiciones propios del programa para llevar a cabo la caracterización.

En el caso del programa para simular en tres dimensiones se trabajó en la parte Electromagnetic y en un análisis Magnetic Nodals para modelar el comportamiento del campo magnético y posteriormente se eligió el tipo de elemento SOLID97 debido a que permite el modelado del campo magnético en 3D. El tipo de elemento es definido por 8 nodos y permite cinco grados de libertad por nodo con seis definidas en el DOFs tales como: el vector potencial (AX, AY, AZ), el tiempo de integración del potencial eléctrico (VOLT formulación clásica) o el potencial eléctrico (VOLT formulación solenoidal), la corriente eléctrica y la fuerza electromotriz. Este tipo de elemento se basa en la formulación del vector magnético potencial y con la medición de Coulomb, es aplicable al análisis magnético de baja frecuencia, magnetostática, corrientes de Eddy (tiempo armónico en AC y análisis transiente), fuerza de campo magnético en voltaje (estática, tiempo armónico en AC y análisis transiente) y circuito electromagnético de campos acoplados (estática, tiempo armónico en AC y análisis transiente). La formulación del SOLID97 tiene dos opciones de formulación: el clásico y el solenoidal. La primera requiere la especificación de la densidad de corriente para la carga de la fuente de corriente. Se debe asegurar que la condición solenoidal ($\text{div}\mathbf{J}=0$) sea especificada, de otra forma se podría desarrollar un error en la solución. La segunda satisface automáticamente la condición solenoidal para resolver la corriente (densidad) directamente usando una conducción acoplada de corriente y solución del campo electromagnético, en la formulación solenoidal es aplicable a fuentes de corrientes libres de Eddy.

La geometría, localización de nodos y sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la Figura 3.3, el elemento es definido por 8 nodos y propiedades del material. Una forma tetraédrica del elemento se puede formar definiendo el mismo nodo para enumerar los nodos M, N, O y P y los nodos K y L. Una forma triangular y piramidal se puede formar como se muestra en la Figura 3.3. El tipo de unidad (MKS) se especifica a través del comando EMUNIT, y determina el valor del MUZERO. El EMUNIT por defecto

se da en el sistema MKS y el $\text{MUZERO}=4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. En adición al MUZERO, está disponible la permeabilidad relativa ortotrópica y especificar a través de MURX, MURY Y MURZ opciones del material, la resistividad ortotrópica es especificada a través de RSVX, RSVY y RSVZ en las propiedades del material.

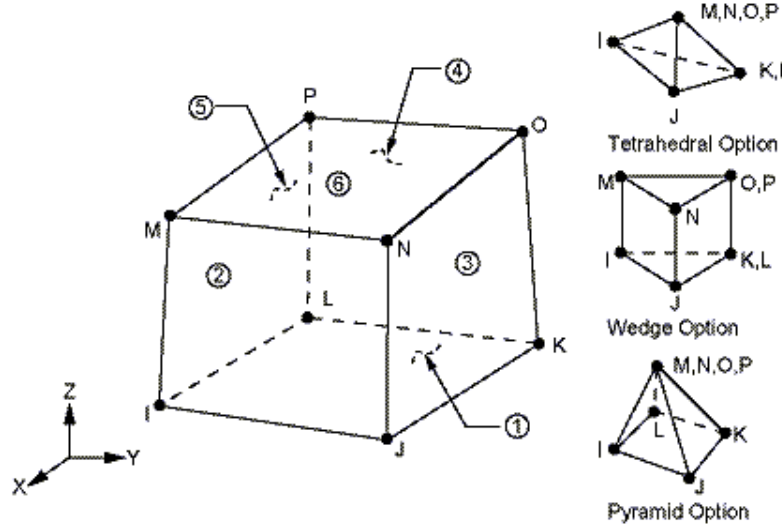


Figura 3.3. Geometría del SOLID97.

El MGXX, MGYY y MGZZ representan la componente vectorial de la fuerza coercitiva para materiales como imanes permanentes y la magnitud de la fuerza coercitiva es la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de las componentes.

La dirección de polarización se determina por las componentes MGXX, MGYY y MGZZ, las direcciones de polarización del imán permanente corresponden a la dirección de las coordenadas del elemento. La orientación del sistema de coordenadas del elemento es descrito por un sistemas de coordenadas. Este sistema de coordenadas se usa para un material ortotrópico en las direcciones de entrada, aplicación de presión y en algunas circunstancias de esfuerzo en las direcciones de salida.

3.2.1 Clasificación de las Formulaciones para la Resolución de Problemas Electromagnéticos

Las formulaciones para la resolución de problemas de campo en electromagnetismo computacional se pueden clasificar según el tipo de ecuación diferencial en derivadas parciales que resuelven. En general, se pueden dividir en dos grandes grupos: las formulaciones que utilizan potenciales escalares y/o vectoriales y las formulaciones basadas en la resolución de las ecuaciones de Maxwell u otro sistema equivalente. Según la formulación que se está empleando en este trabajo, que es el del primer caso sólo se explicará este método de resolución.

Considérese un dominio Ω cualquiera compuesto por dos medios disjuntos, Ω_1 y Ω_2 cuya intercara es Γ_{12} (Figura 3.4). sea Γ su contorno. De acuerdo con los dos tipos de condiciones de contorno que se imponen

(por simplicidad y sin pérdida de generalidad se supondrán homogéneas) éste también se divide en dos partes, Γ_1 y Γ_2 , tales que:

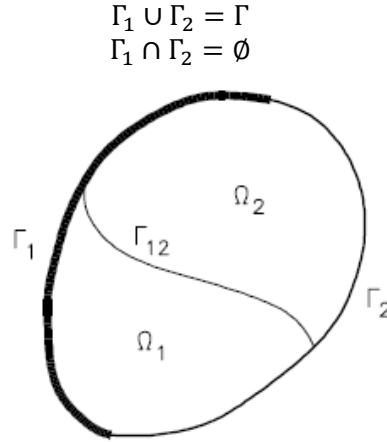


Figura 3.4. Esquema del dominio y contornos para un problema general de electromagnetismo [20].

Los campos electromagnéticos existentes en el dominio de Ω están gobernados por el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales junto con las correspondientes condiciones de contorno sobre la intercara y sobre las fronteras exteriores.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= -\mathbf{K}^{eqv} && \text{en } \Omega \\ \nabla \times \mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \mathbf{J} &= -\mathbf{J}^{imp} && \text{en } \Omega \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho^{imp} && \text{en } \Omega \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 && \text{en } \Omega \\ \mathbf{n} \times \mathbf{E} &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_1 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_1 \\ \mathbf{n} \times \mathbf{H} &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_2 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_2 \\ \mathbf{n}_1 \times \mathbf{E}_1 + \mathbf{n}_2 \times \mathbf{E}_2 &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_{12} \\ \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{B}_1 + \mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{B}_2 &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \\ \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{D}_1 + \mathbf{n}_2 \cdot \mathbf{D}_2 &= \rho_s && \text{sobre } \Gamma_{12} \\ \mathbf{n}_1 \times \mathbf{E}_1 + \mathbf{n}_2 \times \mathbf{E}_2 &= \mathbf{J}_s && \text{sobre } \Gamma_{12}\end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde $\mathbf{E}$ y $\mathbf{H}$ intensidades de campo eléctrico y magnético respectivamente, $\mathbf{D}$ y $\mathbf{B}$ son las densidades de flujo eléctrico y magnético respectivamente, $\mathbf{J}$ es la densidad de corriente, ρ^{imp} es una fuente de densidad de carga eléctrica impuesta, $\mathbf{J}^{imp}$ es una fuente impuesta de densidad de corriente eléctrica, $\mathbf{K}^{eqv}$ es una densidad de corriente magnética equivalente debida a truncamiento de dominios o discontinuidades de medios, ρ_s es una densidad de carga superficial y $\mathbf{J}_s$ es una corriente eléctrica superficial en la intercara. Se debe resaltar que los valores impuestos ρ^{imp} , $\mathbf{J}^{imp}$ y $\mathbf{K}^{eqv}$ deben cumplir ciertas condiciones de compatibilidad.

Las cuatro primeras ecuaciones de (3.1) constituyen las ecuaciones de Maxwell: ley de Faraday, ley de Maxwell-Ampere, ley de Gauss para el campo eléctrico y ley de Gauss para el campo magnético. El sistema (3.1) queda completamente definido al especificar las ecuaciones constitutivas de los materiales que configuran los medios Ω_1 y Ω_2 .

$$\begin{aligned}\mathbf{D} &= \varepsilon(\mathbf{E})\mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu(\mathbf{H})\mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma(\mathbf{E})\mathbf{E}\end{aligned}\tag{3.2}$$

donde ε es la permitividad, μ es la permeabilidad y σ es la conductividad. Frecuentemente la expresión (3.2) se escribe como $\mathbf{H} = \nu\mathbf{B}$, siendo $\nu = 1/\mu$ la reluctividad del medio. En general, estos parámetros constitutivos pueden depender de la posición, de la orientación y la intensidad del campo correspondiente. Si dichos parámetros no dependen de la intensidad de campo, se obtiene un comportamiento lineal del medio (que conducirá en el problema discreto a la resolución de sistemas de ecuaciones lineales). Si además el medio es isotrópico y homogéneo, dichos parámetros son constantes. Por el contrario, si dependen de la intensidad de campo se obtiene un comportamiento no lineal (que en el problema discreto implicará la resolución de sistemas no lineales de ecuaciones). Esta relación no lineal generalmente se conoce experimentalmente o mediante la teoría microscopía de la materia. Por ejemplo, para materiales ferromagnéticos la permeabilidad depende fuertemente de la intensidad de campo y de su historia [20].

3.2.2 Método Basado en Potenciales Escalares y/o Vectoriales

Las formulaciones basadas en la utilización de potenciales son ampliamente utilizadas en el cálculo numérico de campos electromagnéticos. Básicamente se utilizan en problemas estáticos o armónicos y especialmente en problemas de corrientes Foucault. Esto se debe a dos motivos: por una parte, en problemas estáticos y armónicos los términos temporales de las ecuaciones de Maxwell (3.1), pueden tratarse de forma algebraica y por otra parte las ecuaciones en términos de potenciales vectoriales no incluyen de forma explícita las ecuaciones en divergencia (leyes de Gauss) puesto que éstas se verifican automáticamente.

Un ejemplo de esta aproximación para problemas de corrientes de Foucault puede darse en dominios acotados y no acotados. En ambos puntos y con el objetivo de asegurar la unicidad de la solución se presentan varias formulaciones, en las que se introducen diferentes tipos de potencial dependiendo del

número de materiales que se consideren. La nomenclatura utilizada para distinguir las diferentes formulaciones se basa en los siguientes criterios:

1. Los potenciales vectoriales se denotan mediante letras mayúsculas y en negrita ($\mathbf{A}$), mientras que para los potenciales escalares se utilizan símbolos romanos o griegos ($A, \phi, \dots$).
2. Los potenciales se ordenan según el medio a que están asignados, separando cada medio por un guión (-).
3. El primer grupo de potenciales se referirá siempre al medio conductor, mientras que el resto de potenciales estarán asignados a las regiones no conductoras.

La primera formulación se denomina $\mathbf{A}$, V - $\mathbf{A}$, donde en el medio conductor se utiliza un potencial vector $\mathbf{A}$ y un potencial escalar V , mientras que en la región no conductora sólo se emplea el vector potencial. En este caso, los potenciales se definen como:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (3.4)$$

Este tipo de formulaciones se aplica generalmente a problemas compuestos por dos medios: un material conductor Ω_1 , donde aparecen las corrientes de Foucault, rodeado por otro medio conductor Ω_2 , que puede contener fuentes de corriente pero que está libre de corrientes de Foucault (Figura 3.5). La intercara entre ambos medios se denota por Γ_{12} , el contorno exterior de Ω_2 se divide en dos partes según el tipo de condición de contorno que se impone, Γ_B donde se describe la componente normal de la densidad de flujo magnético nula ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = 0$) y Γ_H donde se describe la componente tangencial de la intensidad de campo magnético nula ($\mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$). Es importante resaltar la excelente relación entre el enunciado presente y el problema general planteado (Figura 3.4). Puesto que Ω_2 es un medio libre de corrientes de Foucault, $\mathbf{E}$ no aparece en las condiciones de contorno sobre la frontera exterior. Por consiguiente, los contornos Γ_1 y Γ_2 de la Figura 3.4 se reducen a los contornos Γ_B y Γ_H respectivamente.

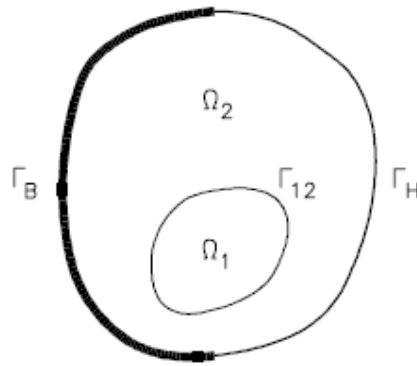


Figura 3.5. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por dos medios [20].

Rescribiendo el sistema (3.1) en términos de los potenciales (3.3) y (3.4) se obtiene la siguiente formulación:

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V &= \mathbf{0} & \text{en } \Omega_1 \\
 \nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 & \text{en } \Omega_1 \\
 \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A} &= \mathbf{J}^{imp} & \text{en } \Omega_2 \\
 \mathbf{n} \times \mathbf{A} &= \mathbf{0} & \text{sobre } \Gamma_B \\
 \nu \nabla \cdot \mathbf{A} &= 0 & \text{sobre } \Gamma_B \\
 \nu \nabla \times \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{0} & \text{sobre } \Gamma_H \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} &= 0 & \text{sobre } \Gamma_H \\
 \mathbf{A}_1 &= \mathbf{A}_2 & \text{sobre } \Gamma_{12} \\
 \nu_1 \nabla \times \mathbf{A}_1 \times \mathbf{n}_1 + \nu_2 \nabla \times \mathbf{A}_2 \times \mathbf{n}_2 &= \mathbf{0} & \text{sobre } \Gamma_{12} \\
 \nu_1 \nabla \cdot \mathbf{A}_1 - \nu_2 \nabla \cdot \mathbf{A}_2 &= 0 & \text{sobre } \Gamma_{12} \\
 \mathbf{n} \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 & \text{sobre } \Gamma_{12}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Esta formulación es una de las más utilizadas, puesto que para medios lineales, isótropicos y homogéneos ν es constante. En consecuencia en la primera y tercera ecuación de (3.5), el termino: $\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A}$ se reduce a $-\nu \Delta \mathbf{A}$ que es fácilmente implementable en un código de elementos finitos. Esta simplificación se utiliza en la resolución de algunos problemas numéricos. En problemas magnetostáticos bidimensionales las ecuaciones de Maxwell (3.1) se reducen a:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}^{imp} \tag{3.6}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{3.7}$$

con $\mathbf{J}^{imp}$ en la dirección del eje z . Además, no existe potencial eléctrico y el potencial vector magnético $\mathbf{A} = (0, 0, A_z)$ es constante respecto al tiempo. Entonces de (3.6) se deduce que $\mathbf{A}$ verifica la ecuación de Poisson: $\nabla \times (\nabla \times (0, 0, A_z)) = \mu(0, 0, J_z^{imp})$. Por consiguiente después de imponer la condición de contraste (gauge de Coulomb) $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, necesaria para asegurar unicidad de la solución, el sistema de ecuaciones anterior se reduce a:

$$-\nabla A_z = \mu J_z^{imp} \tag{3.8}$$

junto con las condiciones de contorno

$$\begin{aligned}
 A_z &= 0 && \text{sobre } \Gamma_B \\
 \frac{\partial A_z}{\partial n} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_H \\
 A_{z1} &= A_{z2} && \text{sobre } \Gamma_{12} \\
 \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_z}{\partial n} &= \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_{z2}}{\partial n} && \text{sobre } \Gamma_{12}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Es importante resaltar que una vez se ha hallado el potencial vector magnético, la densidad de flujo magnético se obtiene mediante diferenciación numérica de acuerdo con (3.3). Además en problemas no lineales bidimensionales, $\mu = \mu(\mathbf{B})$ y por consiguiente la ecuación (3.8) es $-\Delta A_z = \mu(\mathbf{B})J_z^{imp}$.

Las expresiones (3.8) y (3.9) son válidos para un problema de plano bidimensional. En el caso de analizar un problema bidimensional axisimétrico, las ecuaciones anteriores se pueden escribir como:

$$-\frac{\partial}{\partial \rho} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial \rho} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right] \quad \text{en } \Omega \tag{3.10}$$

junto con las condiciones de contorno

$$\begin{aligned}
 \rho A_\varphi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_B \\
 \frac{\partial \rho A_\varphi}{\partial n} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_H \\
 \rho A_{\varphi 1} &= \rho A_{\varphi 2} && \text{sobre } \Gamma_{12} \\
 \frac{1}{\rho \mu_1} \frac{\partial \rho A_\varphi}{\partial n} &= \frac{1}{\rho \mu_2} \frac{\partial \rho A_{\varphi 2}}{\partial n} && \text{sobre } \Gamma_{12}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

La segunda formulación se denomina $\mathbf{A}, V - \psi, \phi$. La diferencia especial respecto a la formulación anterior es la utilización en la región no conductora de potenciales escalares magnéticos en lugar del vector potencial magnético. La idea básica es descomponer la zona no conductora Ω_2 en dos regiones: una que contiene las fuentes de corriente Ω_2^ϕ y la otra compuesta por el resto del medio no conductor Ω_2^ψ , separadas por una intercara $\Gamma^{\psi\phi}$ (Figura 3.6).

En la región no conductora donde existen fuentes de corriente se define el potencial escalar reducido ϕ como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^{imp} - \nabla \phi \tag{3.12}$$

donde $\mathbf{H}^{imp}$ es la intensidad de campo magnético debido a las fuentes de corriente $\nabla \times \mathbf{H}^{imp} = \mathbf{J}^{imp}$ y es por tanto conocido. En el resto de la zona no conductora se define el potencial escalar total magnético como:

$$\mathbf{H} = \nabla\psi \quad (3.13)$$

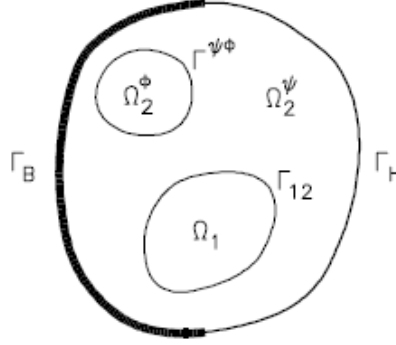


Figura 3.6. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por dos medios donde la zona no conductora se ha dividido en Ω_2^ϕ y Ω_2^ψ [20].

La descripción del medio no conductor mediante únicamente el potencial escalar reducido ϕ conduce en algunas ocasiones a errores de redondeo importantes. Puesto que $\mathbf{H} = \mathbf{H}^{imp} + \nabla\phi$ y el termino $\nabla\phi$ es del mismo orden que $\mathbf{H}^{imp}$, entonces los problemas de cancelación pueden conducir a valores de $\mathbf{H}$ inexactos. Además, para materiales con valores altos de μ y de acuerdo con $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$, los errores de cancelación pueden verse drásticamente amplificados conduciendo a valores de densidad de flujo magnético completamente falsos. El sistema de ecuaciones equivalentes a (3.1) que se debe resolver en función de los nuevos potenciales es:

$$\begin{aligned} \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V &= \mathbf{0} && \text{en } \Omega_1 \\ \nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 && \text{en } \Omega_1 \\ \nabla \cdot (\mu \nabla \psi) &= 0 && \text{en } \Omega_2^\psi \\ \nabla \cdot (\mu (\mathbf{H}^{imp} - \nabla \phi)) &= 0 && \text{en } \Omega_2^\phi \\ \mathbf{n} \cdot (\mu \nabla \psi) &= 0 && \text{sobre } \Gamma_B \\ \psi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_H \\ \mathbf{n}^{\psi\phi} \cdot (\mu_2^\psi \nabla \psi + \mu_2^\phi (\mathbf{H}^{imp} - \nabla \phi)) &= 0 && \text{sobre } \Gamma^{\psi\phi} \\ (\nabla \psi + \mu_2^\phi (\mathbf{H}^{imp} - \nabla \phi)) \times \mathbf{n}^{\psi\phi} &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma^{\psi\phi} \\ \mathbf{n}_1 \cdot \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{n}_2 \cdot \mu_2 \nabla \psi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \\ \nu_1 \nabla \times \mathbf{A} \times \mathbf{n}_1 - \nabla \psi \times \mathbf{n}_2 & && \text{sobre } \Gamma_{12} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \\ \mathbf{n} \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \end{aligned}$$

Es importante resaltar que en general debido a la utilización de ψ y ϕ en lugar de $\mathbf{A}$, en la región no conductora se ha reducido el número de incógnitas de tres a una (en el caso de problemas bidimensionales planos con las componentes del campo en el plano de trabajo el potencial vectorial se reduce a su componente perpendicular). En la solución del problema discreto, esto se traduce en un ahorro considerable del coste computacional. Una simplificación de esta formulación consiste en utilizar únicamente el potencial escalar total magnético ψ en la zona no conductora. Esto da lugar a una formulación denominada $\mathbf{A}, V - \psi$.

Cuando estas formulaciones se utilizan sobre dominios con regiones conductoras no simplemente conexas se generan soluciones espúreas. Esto es debido a la imposibilidad de demostrar la unicidad de la solución bajo dichas condiciones. Por este motivo se introduce una tercera formulación denominada: $\mathbf{A}, V - \mathbf{A}, \psi$. Esta es más general y se puede entender como una combinación de las formulaciones $\mathbf{A}, V - \mathbf{A}$ y $\mathbf{A}, V - \psi$.

En la Figura 3.7 se presenta un esquema del dominio y sus contornos. El dominio total Ω se subdivide en tres regiones: la primera es una región conductora no simplemente conexa Ω_1 , la segunda es una región no conductora Ω_3 , tal que su unión con Ω_1 genera una región simplemente conexa y la tercera Ω_2 , está formada por el resto de la región no conductora.

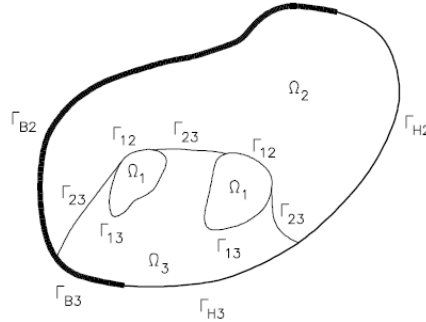


Figura 3.7. Dominio y condiciones de contorno para un problema de corrientes de Foucault compuesto por tres medios [19].

Las intercaras entre las tres regiones se denota por: Γ_{12} , Γ_{13} y Γ_{23} , mientras que los contornos exteriores de las regiones no conductoras se subdividen en dos partes a semejanza de la división realizada en la primera formulación: Γ_{B2} , Γ_{H2} , Γ_{B3} , y Γ_{H3} . El potencial vector magnético se utiliza en Ω_3 , mientras que Ω_2 se utiliza el potencial escalar tota magnético. El sistema de ecuaciones que conduce a la unicidad de los potenciales es:

$$\begin{aligned}
 \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V &= \mathbf{0} && \text{en } \Omega_1 \\
 \nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 && \text{en } \Omega_1 \\
 \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \mathbf{A} &= \mathbf{0} && \text{en } \Omega_3 \\
 \nabla \cdot (\mu \nabla \psi) &= 0 && \text{en } \Omega_2 \\
 \mathbf{n} \times \mathbf{A} &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_{B3} \\
 \nu \nabla \cdot \mathbf{A} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{B3} \\
 \nu \nabla \times \mathbf{A} \times \mathbf{n} &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_{H3} \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{H3} \\
 \mathbf{n} \cdot \mu \nabla \psi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{B2} \\
 \psi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{H2} \\
 \mathbf{A}_1 &= \mathbf{A}_3 && \text{sobre } \Gamma_{13} \\
 \nu_1 \nabla \times \mathbf{A}_1 \times \mathbf{n}_1 + \nu_3 \nabla \times \mathbf{A}_3 \times \mathbf{n}_3 &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_{13} \\
 \nu_1 \nabla \cdot \mathbf{A}_1 - \nu_3 \nabla \cdot \mathbf{A}_3 &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{13} \\
 \mathbf{n} \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \right) &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \text{ y } \Gamma_{13} \\
 \mathbf{n}_{13} \cdot \nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{n}_2 \cdot \mu_2 \nabla \psi &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \text{ y } \Gamma_{23} \\
 \nu \times \mathbf{A} \times \mathbf{n}_{13} - \nabla \psi \times \mathbf{n}_2 &= \mathbf{0} && \text{sobre } \Gamma_{12} \text{ y } \Gamma_{23} \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{A} &= 0 && \text{sobre } \Gamma_{12} \text{ y } \Gamma_{23}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Existen varias alternativas de resolver mediante MEF los sistemas de ecuaciones (3.5), (3.14) o (3.15). Una de las más utilizadas es la formulación de Galerkin, en la que coinciden las funciones de peso y las funciones de forma. Puesto que las expresiones (3.5) y (3.14) pueden ser vistas como un caso particular de la formulación (3.15), a continuación se presentan las ecuaciones correspondientes a la discretización mediante el MEF de la tercera formulación:

$$\begin{aligned}
 \int_{\Omega_1 + \Omega_2} \left(\nu \nabla \times \mathbf{N}_i \cdot \nabla \times \mathbf{A} + \nu \nabla \cdot \mathbf{N}_i \cdot \nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \mathbf{N}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{N}_i \cdot \nabla V \right) d\Omega \\
 - \int_{\Gamma_{12} + \Gamma_{23}} \mathbf{N}_i \cdot (\nabla \psi \times \mathbf{n}_2) d\Gamma = 0
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\int_{\Omega_1} \left(\sigma \nabla N_i \cdot \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla N_i \cdot \nabla V \right) d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega_1} (\mu \nabla N_i \cdot \nabla \psi) d\Omega - \int_{\Gamma_{12} + \Gamma_{23}} N_i \cdot (\nabla \times \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_{13}) d\Gamma = 0$$

donde i es el índice asociado a los nodos de la malla y N_i son las funciones de la forma. Las formulaciones basadas en potenciales permiten modelar adecuadamente materiales no homogéneos así como discontinuidades en materiales. Además, los potenciales vectoriales presentan la gran ventaja de verificar automáticamente la ecuación de la divergencia. Sin embargo, presentan una pérdida notable de precisión en el cálculo de las intensidades de campo eléctrico y magnético debido a la diferenciación numérica. Además, es preciso en imponer cada formulación el *gauge* adecuado [20].

3.3 Modelo 3D de la Tubería

En este modelado se consideran las mismas características y condiciones de los materiales que se emplearon en el análisis en 2D. Para las dimensiones del ducto ferromagnético y el imán, en el primer caso se está considerando una tubería con diámetro nominal de 25.4 cm (diámetro real de 27.305 cm) [Apéndice A], en el caso del imán se basó en trabajos previos, en donde se analizan diversas configuraciones y dimensiones en el cual se puede obtener buenos resultados al momento de llevar a cabo el sensado. Se considera una sola barra magnética con un par de polos, debido a que es suficiente para denotar el comportamiento de $\mathbf{H}$, con las dimensiones consideradas del ducto [13]. Para la configuración del imán dentro de la tubería se muestra en la Figura 3.8, una vista frontal del imán y del ducto, localizado en el centro tanto radial como axialmente.

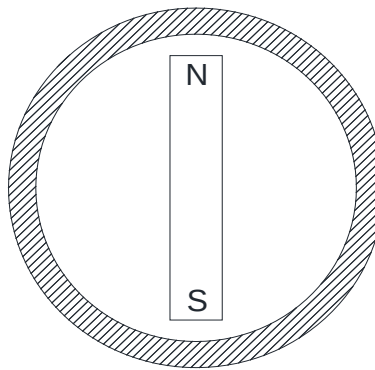


Figura 3.8. Configuración del imán y el ducto.

En el esquema de la Figura 3.9 se muestra la vista del imán y en la Tabla 3.1 las dimensiones que conducen a una mejor lectura para el campo magnético $\mathbf{H}$ [13].

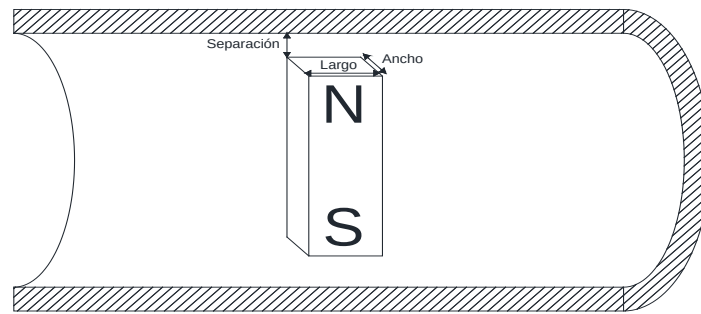


Figura 3.9. Vista del Imán.

Largo (m)	Ancho (m)	Separación (m)
0.0254	0.0254	0.0254

Tabla 3.1. Dimensiones del imán.

Para ubicar la posición del sensado, se partió de un estudio que analiza el comportamiento de un ducto con un diámetro nominal de 30.48 cm, en el cual establece una localización adecuada para el sensado a una distancia axial de 2D (dos veces el diámetro del ducto) [20]. Como en este caso se tiene un diámetro nominal de 25.4 cm se examinó cómo varía el comportamiento del campo magnético a lo largo de diversas posiciones axiales y así poder establecer una ubicación adecuada para el sensado. Las variaciones consideradas para la posición axial se consideraron de 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D y 3.0D como se muestra en la Figura 3.10.

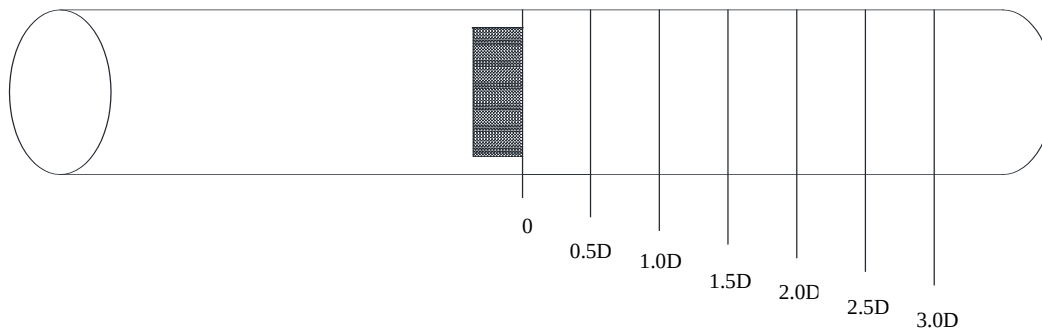


Figura 3.10. Distancias axiales consideradas.

La longitud total del ducto que se tomó para analizar todas las condiciones de falla fue de 1.8254 m.

Para cada posición axial mencionada anteriormente se varió el sensado radialmente o a diversos gaps para comparar que lectura tiene una mejor resolución del defecto presente, los gaps que se tomaron en cuenta fueron los siguientes: de 2.255 mm ($r_3 = 0.125$ m), 4.255 mm ($r_2 = 0.123$ m), 5.255 mm ($r_1 = 0.122$ m) y 7.255 mm ($r_0 = 0.120$ m). Ya que a separaciones menores de 7.255 mm se reduce al mínimo el efecto de la falla, Figura 3.11. El sensado se llevo a cabo con una medición a 3° de separación a lo largo de toda la circunferencia.

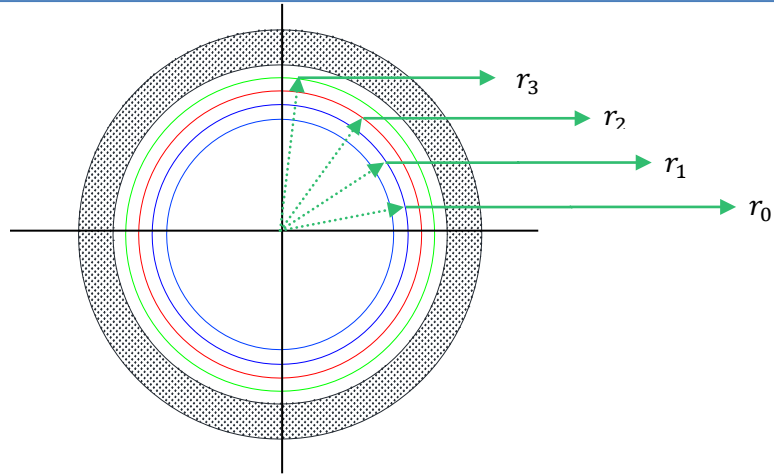
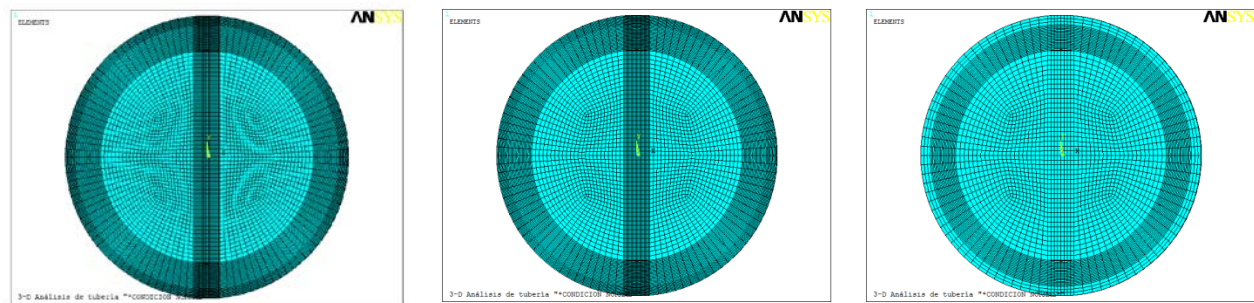


Figura 3.11. Configuración radial para el sensor.

3.4 Análisis de Sensibilidad

Para esta parte del análisis del MEF se realizaron diversas configuraciones de mallado para obtener un patrón de comportamiento y elegir que tipo de mallado es el que tiene una convergencia hacia un valor, considerando en este caso un margen de error menor del 10% en la zona más alejada del imán. En la Figura 3.12 se muestran los tipos de mallados probados para las simulaciones con las consideraciones mencionadas anteriormente



Mallado 1

Mallado 2

Mallado 3

Figura 3.12. Mallados para las simulaciones.

Para el Mallado 1, el cual se tomó un tiempo aproximado de solución de 46 hrs, se obtuvo el campo magnético $\mathbf{H}$ a diversas posiciones axiales mencionadas anteriormente y a una distancia radial de 0.125 m ya que a este valor se tiene una mejor lectura para condiciones normales. También se hizo lo mismo para el Mallado 2 (solución aproximada de 36 hrs) y el Mallado 3 (solución aproximada 3 hrs) [Apéndice C]. En este caso se utilizará el Mallado 1 como referencia debido a que en éste se refinó mayormente el

mallado y es el que consumió más tiempo para llevar a cabo la simulación. En la Tabla 3.2 se muestra la comparación entre el *mallado 1 vs mallado 2* y el *mallado 1 vs mallado 3*.

Mallado 1 vs Mallado 2			Mallado 1 vs Mallado 3		
Posición axial	Apéndice	% Error Promedio	Posición axial	Apéndice	% Error Promedio
0.5D	C-1	0.26	0.5D	C-1	8.6
1.0D	C-2	0.6	1.0D	C-2	1.7
1.5D	C-3	0.8	1.5D	C-3	3.4
2.0D	C-4	0.5	2.0D	C-4	1.4
2.5D	C-5	0.15	2.5D	C-5	0.43
3.0D	C-6	0.12	3.0D	C-6	0.79

Tabla 3.2. Comparación de mallados.

Para las pruebas de simulaciones que se llevaron a cabo con un equipo con las siguientes características:

- Procesador Intel core i3
- Memoria Ram de 4 GB
- Velocidad de 2.53 GHz
- Sistema operativo 64 bits
- Windows 7 profesional
- Disco duro de 640 GB

De estas comparaciones realizadas, se observa que de la primera comparación se tiene un margen de error promedio menor del 2% pero el tiempo de trabajo computacional sigue siendo muy grande para llevar a cabo todos los análisis que se pretenden modelar. En tanto que para el segundo caso se tiene un error promedio máximo es del 8.6% pero en esta zona es aún cercana a la posición del imán y no afecta en un incremento muy grande en el porcentaje de error de las siguientes posiciones axiales se opta por esta opción ya que el tiempo del trabajo computacional es menor y se puede considerar adecuado para llevar a cabo los análisis.

Ya con un tipo de mallado seleccionado, se analizó el comportamiento del campo magnético $\mathbf{H}$ en condiciones normales, así también para las condiciones de falla que se consideraron *corrosión, fugas, grietas e incrustaciones del material*.

Para limitar el efecto del campo magnético únicamente a lo largo del ducto, se aplicó las condiciones de frontera sobre las áreas en las dos partes laterales del ducto y en la superficie externa del ducto poniendo un potencial magnético igual a cero.

3.5 Análisis de Flujo Magnético en el MEF

El análisis del flujo magnético en 3D se realizó primeramente en una tubería bajo condiciones nominales (sin fallas o defectos). Lo anterior para observar la distribución y comportamiento del campo magnético a diversas posiciones axiales como las mostradas en la Sección 3.2. La distribución del campo magnético que se obtuvo a lo largo del ducto se muestra en la Figura 3.13.

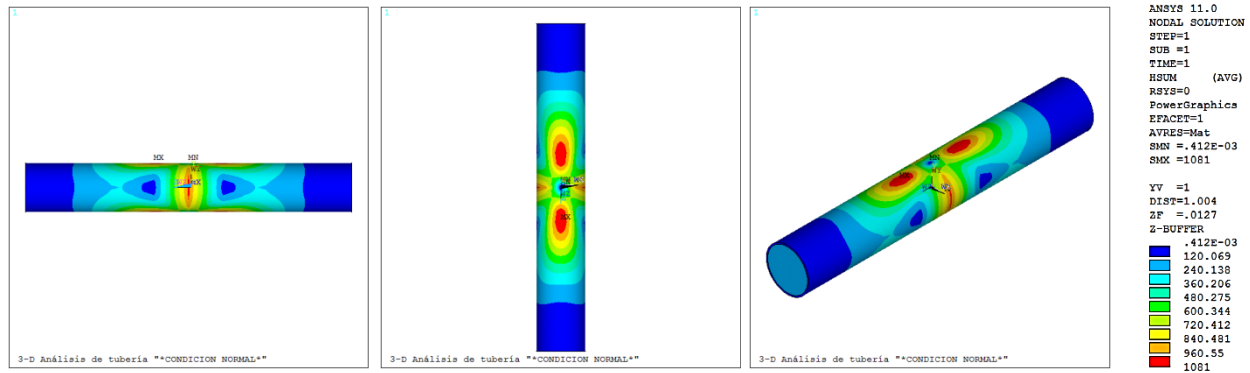


Figura 3.13. Distribución del campo magnético en el ducto.

Como se puede observar la distribución del campo magnético es uniforme y simétrico en el ducto, teniendo la mayor concentración de campo magnético en la región del imán y disminuyendo conforme se aleja del imán, en este análisis se percibe el comportamiento del campo magnético a diferentes posiciones axiales y separaciones (gaps).

3.6 Análisis de Fallas en el MEF

Ya definidas las características como posición, mallado y ubicaciones axiales se procedió a analizar las fallas: *corrosión, fugas, grietas e incrustaciones del material*; para estas fallas a continuación se muestran las dimensiones y consideraciones que se tomaron en cuenta para modelar en el software a través del MEF.

Para todas las fallas consideradas para analizar en el modelado por MEF, como en este caso se considera un imán en condiciones estáticas se presentan tres localizaciones representativas para denotar el comportamiento del campo magnético H a lo largo de todas las posiciones axiales y radiales definidas en la sección anterior. Las consideradas más importantes, por las condiciones estáticas del imán son: a una cercana, media y lejana a los efectos del polo del imán, los cuales se representada por los ángulos de 0° , 45° y 90° en sentido antihorario, en la Figura 3.14 se muestran dichos ángulos.

La zona más cercana donde se ve afectada por el polo es a 90° , disminuyendo a 45° y siendo la más alejada a 0° . Para posteriormente ir incrementándose hasta llegar al otro extremo del polo.

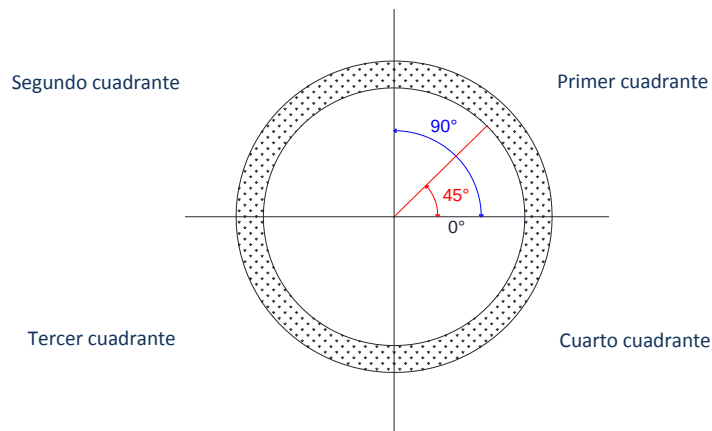


Figura 3.14. Análisis de fallas a 0°, 45° y 90°.

Aprovechando la simetría de este análisis, se analiza sólo el primer cuadrante para denotar los defectos ya que los tres cuadrantes restantes presentan el mismo comportamiento del campo magnético $\mathbf{H}$ por si se presentase un defecto.

3.6.1 Grietas

Para el análisis de una falla por el MEF, se consideraron características como espesor, longitud y ancho para modelar la falla en el programa de simulación, en algunos trabajos previos se consideran algunos porcentajes de espesores para dimensionar la falla entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: del 100% (10.75 in), 50% (5.375 in), 20% (2.15 in) y 10% (1.075 in) [12].

Para analizar la grieta se considera un 20% del espesor, ya que un tamaño menor reduce el efecto de la falla para obtener una buena lectura al sensor el campo magnético $\mathbf{H}$ y se tendría que acercar demasiado el sensor para una mejor lectura. La longitud de arco de la grieta es aproximadamente de 0.9 mm [20], para compensar el tamaño del espesor tomado anteriormente y debido a que son dimensiones razonables para analizar este tipo de defectos.

Por último, el ancho de la grieta *tiene una profundidad de 4 mm* a lo largo de la posición axial. En la Figura 3.15 se muestran las características del modelado que se llevó a cabo en el programa.

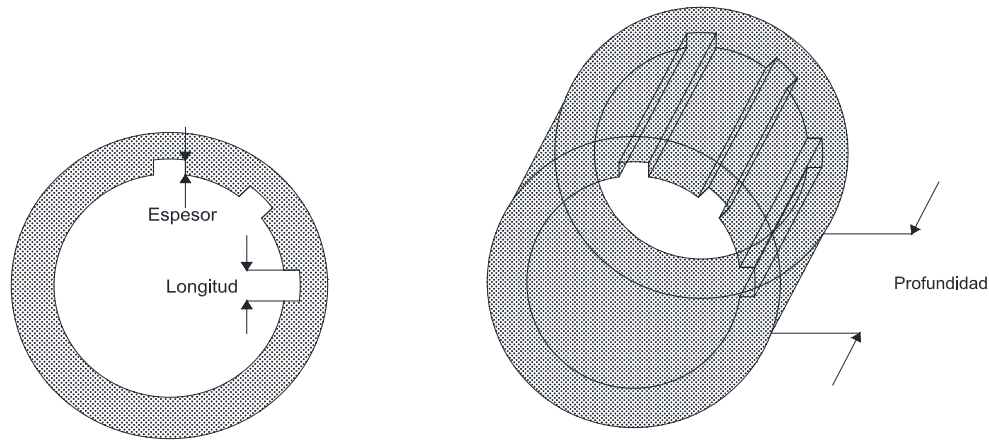


Figura 3.15. Esquema de la Grieta a 0°, 45° y 90°.

En el modelado por MEF se emplearon todas las dimensiones antes mencionadas y el tipo de Mallado mencionado en la Sección 3.2.1. Al analizar el comportamiento que presenta el campo magnético $\mathbf{H}$ en la región de la falla se observó un incremento en dicha zona para cada posición angular que se consideró y en el caso de las posiciones angulares se modelaron y simularon por separado para las distintas posiciones axiales.

3.6.2 Fugas

Para el análisis de la Fuga, en la Figura 3.16 se muestran las características del material modelado en el MEF. En este tipo de falla los tamaños de longitud y profundidad son las mismas que la grieta, en tanto que el espesor para la fuga es del mismo tamaño que el espesor nominal del ducto que se está considerando para los análisis de 0.927 cm.

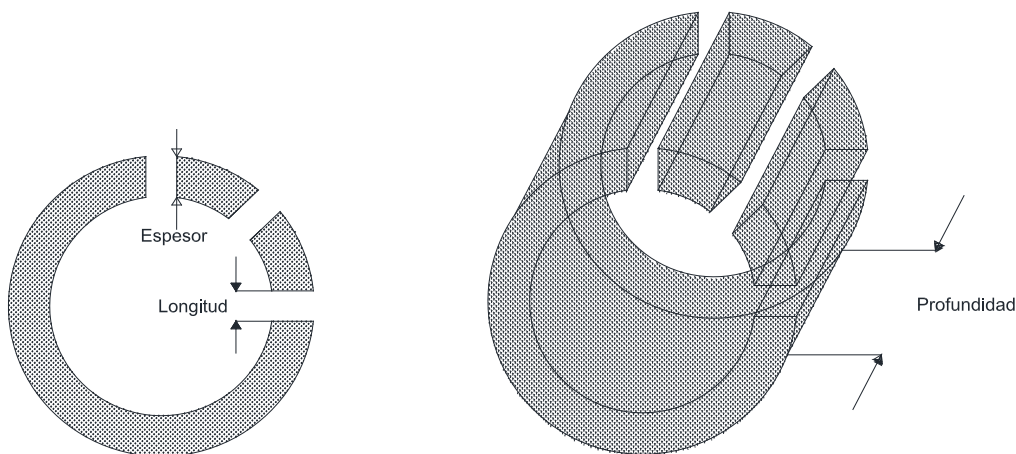


Figura 3.16. Esquema de la Fuga a 0°, 45° y 90°.

Para este tipo de defecto se cambiaron algunas propiedades en el ducto para aplicar condiciones de aire a las diversas posiciones angulares.

En esta falla analizada se notó que los efectos de fuga de flujo magnético se incrementó especialmente en la zona del sensado, debido la salida de las líneas de flujo en esa parte provocada por la falla.

3.6.3 Incrustaciones

El análisis de las incrustaciones en el ducto se considera de las mismas dimensiones que la grieta, con características y propiedades iguales al de la tubería. En la Figura 3.17 se puede observar la configuración modelada en el MEF en la parte de la falla.

La característica principal que se tiene de las incrustaciones es que éstas se modelan con propiedades iguales a la del ducto para notar el efecto que provoca el material adherido, bordes, mala soldadura y algunas variaciones geométricas que cambian la cavidad del ducto.

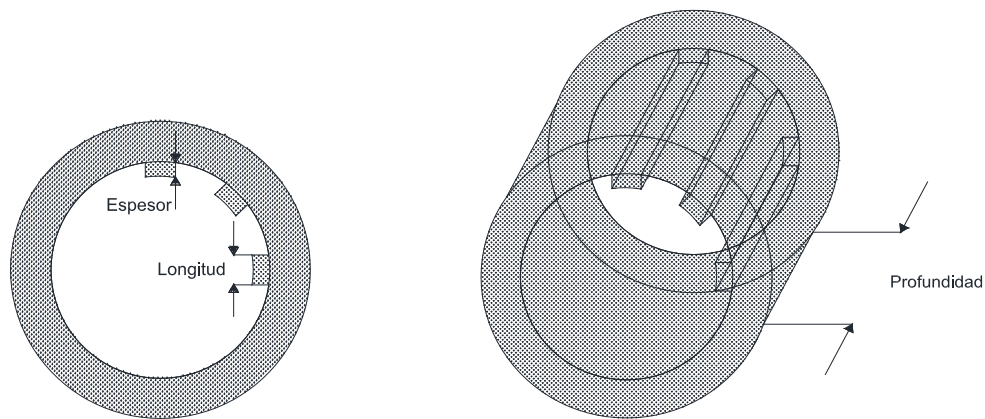


Figura 3.17. Esquema de la Incrustación a 0°, 45° y 90°.

3.6.4 Corrosión

Como último análisis de falla se consideraron fugas en el ducto, las cuales se modelaron como pequeñas secciones del ducto para incluir porciones de aire como las que se muestran en la Figura 3.18, donde se aprecian las secciones de aire en el ducto.

En esta parte sólo se observa la parte frontal del ducto en tanto que la profundidad es de 3 mm para las dos extrusiones y en el espesor del ducto se combinaron elementos de aire y metal como se muestra en la Figura 3.18 (a) y (b), en la que se muestran zonas de color negro (metal) y blancas (aire). En este defecto se pretende representar el desgaste del material debido a factores externos, antigüedad del ducto, entre otros.

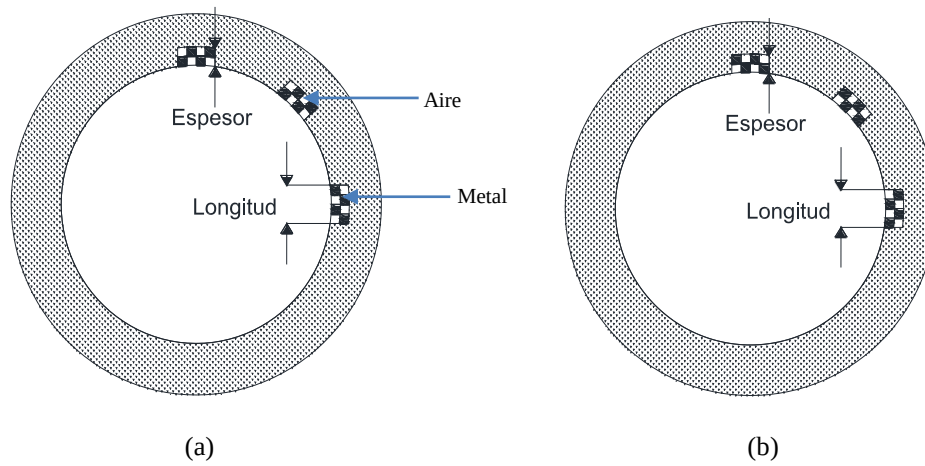


Figura 3.18. Esquema de la Fuga.

En todos los modelados que se analizaron anteriormente se refino el mallado en la zona del sensado para obtener una mejor aproximación al resultado real y las variaciones que se implementaron para cada análisis dependieron del tipo de defecto analizado y las propiedades del medio o material.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de Resultados

4.1 Resultados del Campo Magnético en Condiciones Nominale

En esta sección se comparan los resultados analíticos obtenidos del flujo magnético en la región del imán y a lo largo del ducto contra los obtenidos con el MEF. Para ello se emplearán las características del imán, del ducto y de la región del sensado para aproximar el comportamiento del flujo magnético en la *región 0*, como las que se enuncia en la Tabla 4.1.

Medio o material	Área (m ²)	Magnetización (A/m)	Permeabilidad
Imán	6.452×10 ⁻⁴	868000	1.2
Ducto	2.355×10 ⁻⁴	-----	2000
Aire	1.1455×10 ⁻⁴	-----	1

Tabla 4.1. Valores considerados para el cálculo.

Calculando el campo magnético en la zona del imán (*región 0*), de acuerdo a la Ecuación (2.86) y (2.87) se tienen los siguientes resultados:

$$\mathfrak{R}_{D(circunferencial)} = \frac{2\pi(0.1312525m)(180^\circ)}{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}\right)(2000)(2.355 \times 10^{-4})(360^\circ)} = 696.79 \times 10^3 A/m$$

$$\mathfrak{R}_{S(circunferencial)} = \frac{2\pi(0.125m)(180^\circ)}{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}\right)(1)(1.1455 \times 10^{-4})(360^\circ)} = 2.728 \times 10^9 A/m$$

Para calcular el flujo total que se tiene en el imán, se calcula primero la densidad de flujo magnético **B** Ecuación (2.88) y posteriormente la Ecuación (2.89).

$$\mathbf{B}_T = \left(4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}\right)(1.2)(868000 A/m) = 1.3089 \text{ T}$$

El flujo total en el imán es:

$$\phi_T = (1.389 \text{ T})(6.452 \times 10^{-4} m) = 8.44 \times 10^{-4} Wb$$

Por lo tanto:

$$\phi_1 = \phi_2 = 4.22 \times 10^{-4} Wb$$

Calculando la $\mathfrak{R}_{eq}$ y la *Fuerza electromotriz* en la *región 0* se obtiene:

$$\mathfrak{R}_{eq1} = \mathfrak{R}_{eq2} = \left(\frac{1}{696.79 \times 10^3 A/m} + \frac{1}{2.728 \times 10^9 A/m}\right)^{-1} = 696.612 \times 10^3 A/m$$

$$\mathcal{F} = (4.22 \times 10^{-4} Wb)(696.612 \times 10^3 A/m) = 293.970 A - vuelta$$

Calculándose el flujo en el ducto y en la zona del sensado para la *región 0* se tiene:

$$\phi_{D(circunferencial)} = \frac{293.970 A - vuelta}{696.79 \times 10^3 A/m} = 4.219 \times 10^{-4} Wb$$

$$\phi_{S(circunferencial)} = \frac{293.970 A - vuelta}{2.728 \times 10^9 A/m} = 1.077 \times 10^{-7} Wb$$

Para aproximar el comportamiento a lo largo del ducto a diversas regiones se calcula la reluctancia $\mathfrak{R}_{D(axial)}$ a partir de la Ecuación (2.96). El área a considerar para el cálculo de la reluctancia axial se muestra en la Figura 4.1.

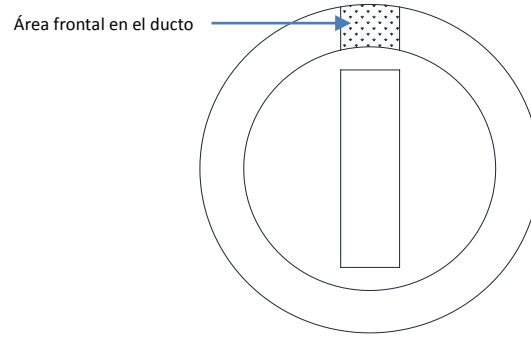


Figura 4.1. Área frontal considerada en el ducto.

Con un espesor de imán de $0.0254 m$ y un radio externo del ducto de $r_e=0.136525 m$ y un radio interno $r_i=0.127255m$. El cálculo del área se analiza como se muestra en la Figura 4.2:

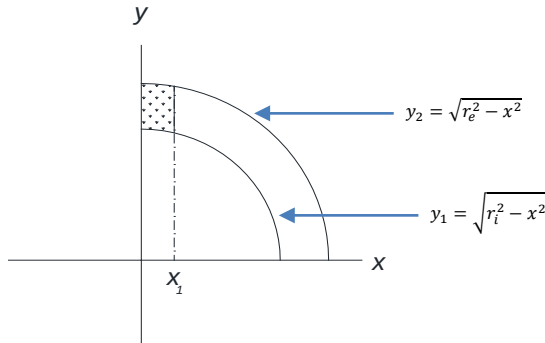


Figura 4.2. Área de la sección frontal.

Aplicando la integral para encontrar el área bajo la curva se obtiene:

$$A = 2 \int_0^{x_1} (y_2 - y_1) dx$$

Donde:

$$x_1 = 0.0127m$$

Resolviendo la integral anterior se obtiene un área de:

$$A = 2.3595 \times 10^{-4} m$$

Ya con el área frontal obtenida se calcula la reluctancia $\mathfrak{R}_{D(axial)}$ producida en la región.

$$\mathfrak{R}_{D(axial)} = \frac{2n(0.0254)}{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}\right) (2000)(2.3595 \times 10^{-4})} = n(85.665 \times 10^3)$$

A lo largo del ducto el flujo magnético se aproxima mediante la ecuación 2.97:

$$\phi_{Dn} = 4.219 \times 10^{-4} \left(\frac{696.79 \times 10^3}{696.79 \times 10^3 + n(85.665 \times 10^3)} \right) \quad (4.1)$$

En el caso para la zona del sensado a diversas regiones se calcula la $\mathfrak{R}_{S(axial)}$ a partir de la Ecuación (2.99). El área imaginaria que se considera en la zona del sensado se muestra en la Figura 4.19.

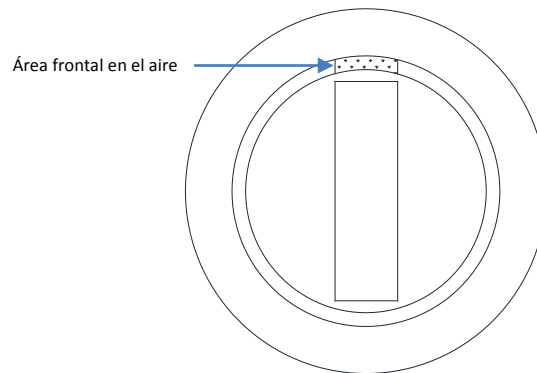


Figura 4.3. Área frontal considerada en el aire.

Aplicando la integral como en el caso anterior para encontrar el área bajo la sección circunferencial en el aire, con el mismo espesor de imán, considerando un $r_e=0.127255m$ y un $r_i=0.122725 m$.

Se obtiene un área con el valor siguiente:

$$A = 1.15 \times 10^{-4}m$$

Posteriormente, se calcula la reactancia $\Re_{S(axial)}$ producida en la región del sensado.

$$\Re_{S(axial)} = \frac{2n(0.0254)}{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{Wb}{A-m}\right) (1)(1.15 \times 10^{-4})} = n(351.525 \times 10^6)$$

A lo largo del aire el flujo magnético se aproxima mediante la ecuación 2.100:

$$\phi_{Sn} = 1.077 \times 10^{-7} \left(\frac{2.728 \times 10^9}{2.728 \times 10^9 + n(351.525 \times 10^6)} \right) \quad (4.2)$$

Ya obtenidos los resultados para aproximar el comportamiento del flujo en el ducto ϕ_{Dn} y en el aire ϕ_{Sn} a diversas regiones se procede a realizar una comparación entre los resultados obtenidos de las ecuaciones (4.1) y (4.2) con los del MEF.

Para analizar los resultados en el MEF se tomaron en consideración un total de 35 regiones y por medio de gráficas se hará la comparativa de ambos resultados obtenidos el analítico y el del MEF

En estos análisis se obtiene un promedio del flujo en el MEF entre los flujos radiales y axiales a lo largo de todas las regiones, para cada región se tomaron 5 muestras. En un principio para las primeras 4 regiones (cada región con un espesor axial igual al del imán), se tomaron un total de 10 muestras axiales y posteriormente se compararon con los obtenidos a 5 muestras, como el error que se obtuvo entre estos dos fue pequeño se optó por trabajar con 5 muestras.

Se llevan a cabo dos comparativas para observar la aproximación propuesta una para el ducto (Figura 4.4) y otra para las variaciones en el aire (Figura 4.5) para las 35 regiones. Iniciando con la región 0, en esta zona del imán se observa que el método propuesto es igual al del MEF y posteriormente como va en aumento las regiones el método tiende a perder exactitud, debido a que el método propuesto solo es aplicable en la región del imán y regiones cercanas.

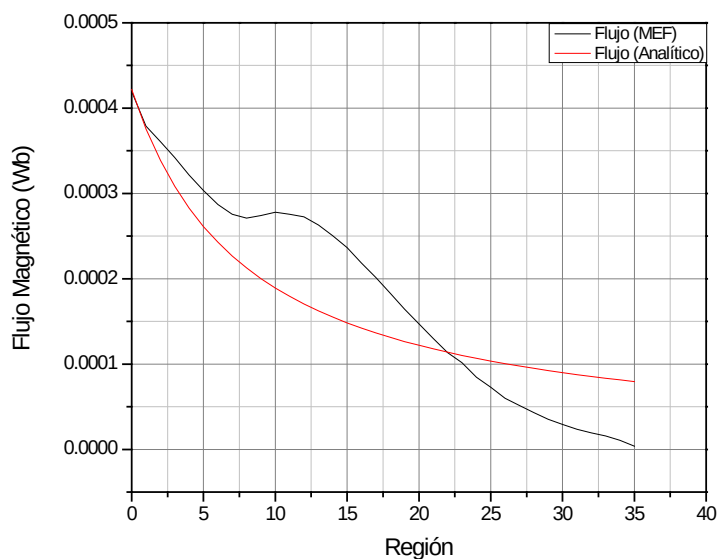


Figura 4.4. Comparación del flujo magnético MEF vs Analítico en el ducto.

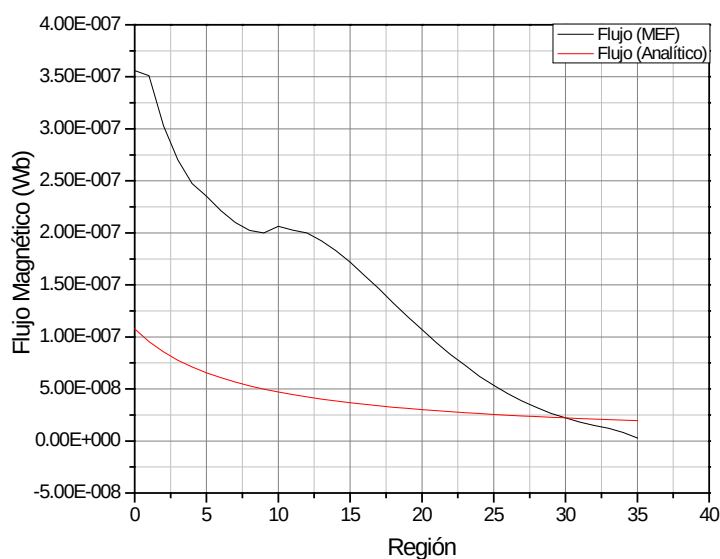


Figura 4.5. Comparación del flujo magnético MEF vs Analítico en el aire.

En estas comparativas obtenidas se puede notar que en el caso del ducto de la Figura 4.4 el modelo matemático propuesto se satisface en las primeras regiones y posteriormente se alejan. En el caso especial de la *región 0*, el margen de error obtenido al comparar el resultado analítico y el obtenido con el programa de simulación MEF fue menor del 1% como se puede observar en la Tabla 4.2. Porque la equivalencia propuesta al de un transformador e inductor es similar con el del imán y el del ducto sólo en la región que abarca el espesor del imán.

Medio o material	Flujo Magnético (Wb)	
	Calculados	Obtenidos por MEF
Ducto	4.219×10^{-4}	4.20×10^{-4}
Aire	1.077×10^{-7}	3.56×10^{-7}

Tabla 4.2. Comparación de resultados analítico y MEF en la región 0.

Con estos resultados obtenidos para aproximar el comportamiento del flujo a lo largo del ducto, sólo en el caso de la *región 0* se pueden validar los resultados que se obtuvieron en el MEF.

En el caso del aire en la *región 0* (Figura 4.5), se tiene una diferencia aun mayor ya que en ésta se consideró un área imaginaria el cual puede provocar un incremento en el margen de error como la observada en la Tabla 4.2. Para analizar el flujo a regiones posteriores los resultados obtenidos sólo modelan un comportamiento aproximado. A partir del análisis realizado anteriormente es muy complicado obtener un modelado matemático que permita predecir el comportamiento del flujo a lo largo del ducto.

4.2 Condiciones Normales

A partir de las condiciones explicadas en el Capítulo 3, el tipo de mallado, posiciones axiales y radios de sensado (gaps) para analizar el comportamiento del campo magnético **H** en la cavidad interna de una tubería ferromagnética por medio del Método del Elemento Finito (MEF) con el software ANSYS 11.0, se obtienen diversos histogramas donde se denota el comportamiento del campo magnético.

En este análisis no se varió la geometría de la tubería pero sí la posición de medición de **H**. Se consideraron variaciones en dos sentidos: de forma axial y forma transversal. Las distancias sobre su eje axial de la Sección 3.2 son: 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D donde D es el diámetro de la tubería. Así también a diversos radios de sensado de 0.125 m (gap=2.255 mm), 0.123 m (gap=4.255 mm), 0.122 m (gap=5.255 mm) y 0.120 m (gap=7.255 mm) para cada distancia axial. Los resultados obtenidos para condiciones normales se muestran en la Figura 4.6.

De estas formas de onda en condiciones normales se puede observar que el efecto de los polos disminuye conforme se aleja axialmente a la posición del imán, además de que **H** tiende a presentar un comportamiento sinusoidal aunque con variaciones. Dichas variaciones son provocadas por el efecto de los polos ubicados a 90° y 270°, la cual se puede notar como crestas o picos en el comportamiento de la gráfica.

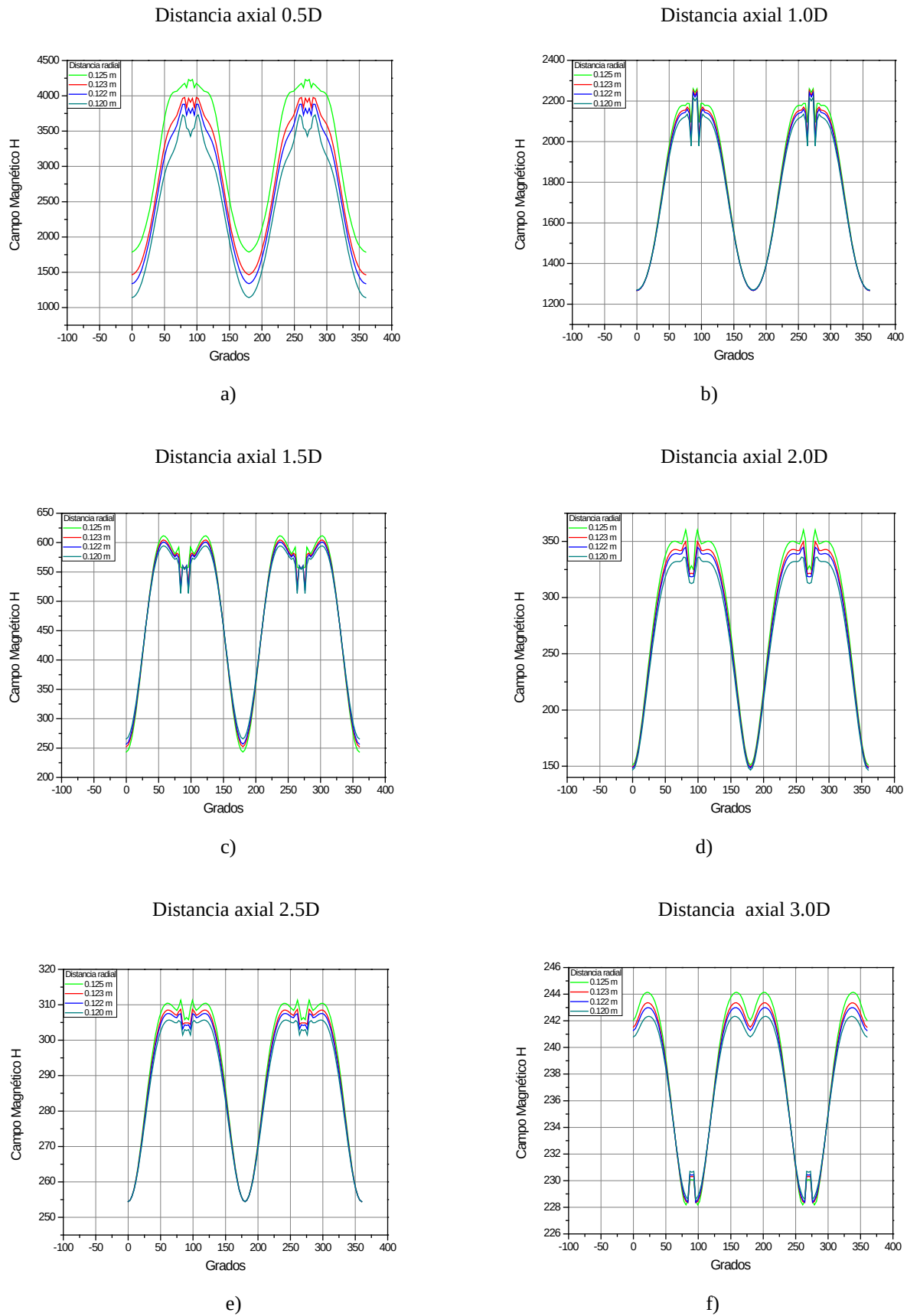


Figura 4.6. Comportamiento de H en condiciones normales a diversas posiciones axiales y transversales.

4.3 Condiciones de Falla

En este análisis, se varió la geometría del ducto ferromagnético representando algunos de los defectos que se pudiesen presentar y qué efecto tiene sobre el comportamiento de $\mathbf{H}$. Algunos defectos que se tomaron en cuenta fueron: *corrosión, fugas, grietas e incrustaciones en el material*. Para cada uno de estos defectos y con el objetivo de analizar el efecto de la variación de $\mathbf{H}$ en el ducto se realizaron simulaciones con las distintas posiciones de medición mencionadas en la Sección 3.2. Además se consideran tres posiciones angulares diferentes de 0° , 45° y 90° (Sección 3.6) por el análisis estático del imán que se está analizando en sentido antihorario para cada posición axial con la finalidad de identificar y mostrar las ubicaciones más representativas para una variación en la cavidad interna de la tubería. Para no llevar a cabo las simulaciones de los otros tres cuadrantes se aprovechó la simetría transversal de la tubería.

Para estos tipos de condiciones se pretende resaltar las variaciones presentes en el ducto ferromagnético y cómo estas afectan el comportamiento sinusoidal de $\mathbf{H}$, posteriormente se analizan las características principales de cada uno de los defectos y después se hace un análisis general de todos los defectos considerados.

4.3.1 Corrosión

En este caso, a una distancia radial cercana al ducto la corrosión presentan variaciones muy pronunciadas, considerando la posición axial de 1.0D y una distancia radial de 0.125m (gap=2.255 mm), como se muestra en la Figura 4.7.

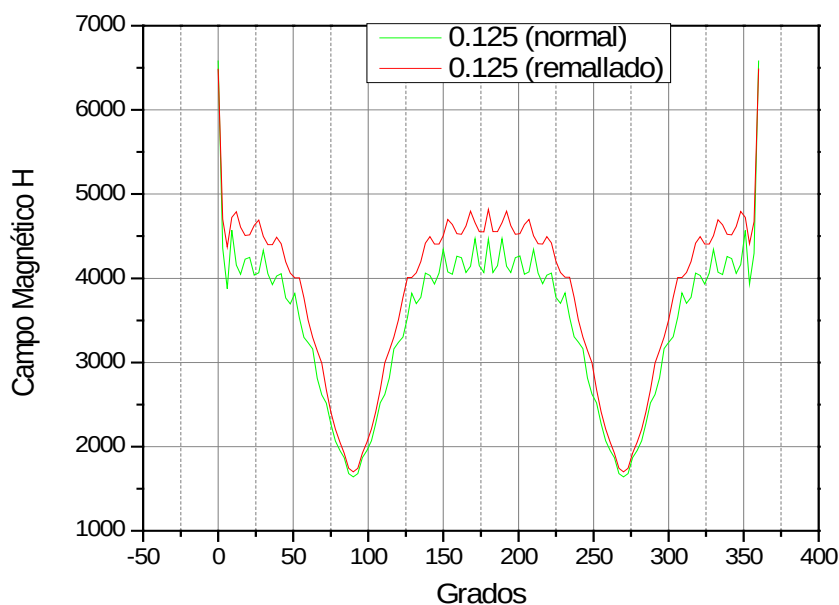


Figura 4.7. Comparación de $\mathbf{H}$ con un mallado normal y uno fino a una distancia radial de 0.125 m (gap=2.255 mm).

Estas variaciones se deben al cambio de condición de frontera (transición aire-metal), así como a la resolución del mallado. En este caso se hace una comparativa entre un mallado normal de 3hrs y un mallado más fino de 8 hrs, en donde se puede notar que el mallado de mayor tiempo tiende ser mas uniforme y con menor variación que el otro.

Cuando se utiliza un mallado más fino para analizar esta parte, el efecto de las variaciones disminuiría notablemente, pero para fines de análisis no se utilizará un mallado muy fino ya que sólo se denotará el efecto de la falla, además de que el error en el resultado no excede el 2%. Para posteriores posiciones axiales y condiciones de falla se tomará la misma condición de análisis.

Para este tipo de falla presente en el ducto se muestra un incremento muy pronunciado en las posiciones angulares de 0° , 45° , y 90° , como se ve en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 respectivamente, para las diferentes distancias axiales y radios que se tomaron en cuenta para el análisis.

Los incrementos debido a la corrosión son remarcados en todas las posiciones axiales, en tanto que los decrementos varían de la amplitud dependiendo de la ubicación axial y distancia radial. Pero para una mejor distinción de la variación en el comportamiento de **H**, es más visible a una distancia axial de $1.5D$, debido a que éste presenta un comportamiento sinusoidal en comparación con las otras distancias axiales que tienen mayor número de variaciones.

Corrosión localizada a 0° : En este caso en todas las distancias radiales **H** presenta variaciones en su comportamiento; para la distancia radial de 0.125 m se tiene un incremento en amplitud en tanto que para las distancias de 0.123 m, 0.122 m y 0.120 m se tienen un decremento de **H**, este incremento ocurre debido a que se tiene una mayor concentración de **H** en la región del defecto y disminuye conforme se aleja de la cavidad interna de la tubería dejando una concentración de **H** cada vez menor para el sensado.

En este caso se tomará en cuenta la parte más cercana a la cavidad a una distancia radial de 0.125m, debido a que el incremento es más pronunciado con respecto a los decrementos de las otras distancias radiales. Este incremento de amplitud es de aproximadamente un 100.8% mayor que la amplitud de la onda localizada a 180° , como se observa en la Figura 4.8 c).

Corrosión localizada a 45° : Se considera la misma distancia radial de 0.125 m que para la corrosión a 0° , ya que presenta un comportamiento similar en los incrementos y decrementos, para este caso el incremento debido al defecto es de aproximadamente 102.8% mayor que la amplitud de la onda localizada a 135° , ver Figura 4.9 c).

Corrosión localizada a 90° : El comportamiento que presenta a esta posición angular es diferente a las otras dos, debido a que se ve afectada por el efecto del polo provocando que haya una mayor concentración de **H** en esta región del sensado y disminuyendo gradualmente el valor de **H**; no súbitamente como lo ocurrido en los dos casos anteriores.

Esta concentración provoca la presencia de picos en todas las posiciones radiales y bajo estas condiciones la distancia radial de 0.125 m sigue siendo la más representativa para detectar la variación de **H**, ver Figura 4.10 c). El incremento debido al defecto es de aproximadamente 183% mayor que la posición de la onda localizada a 270° .

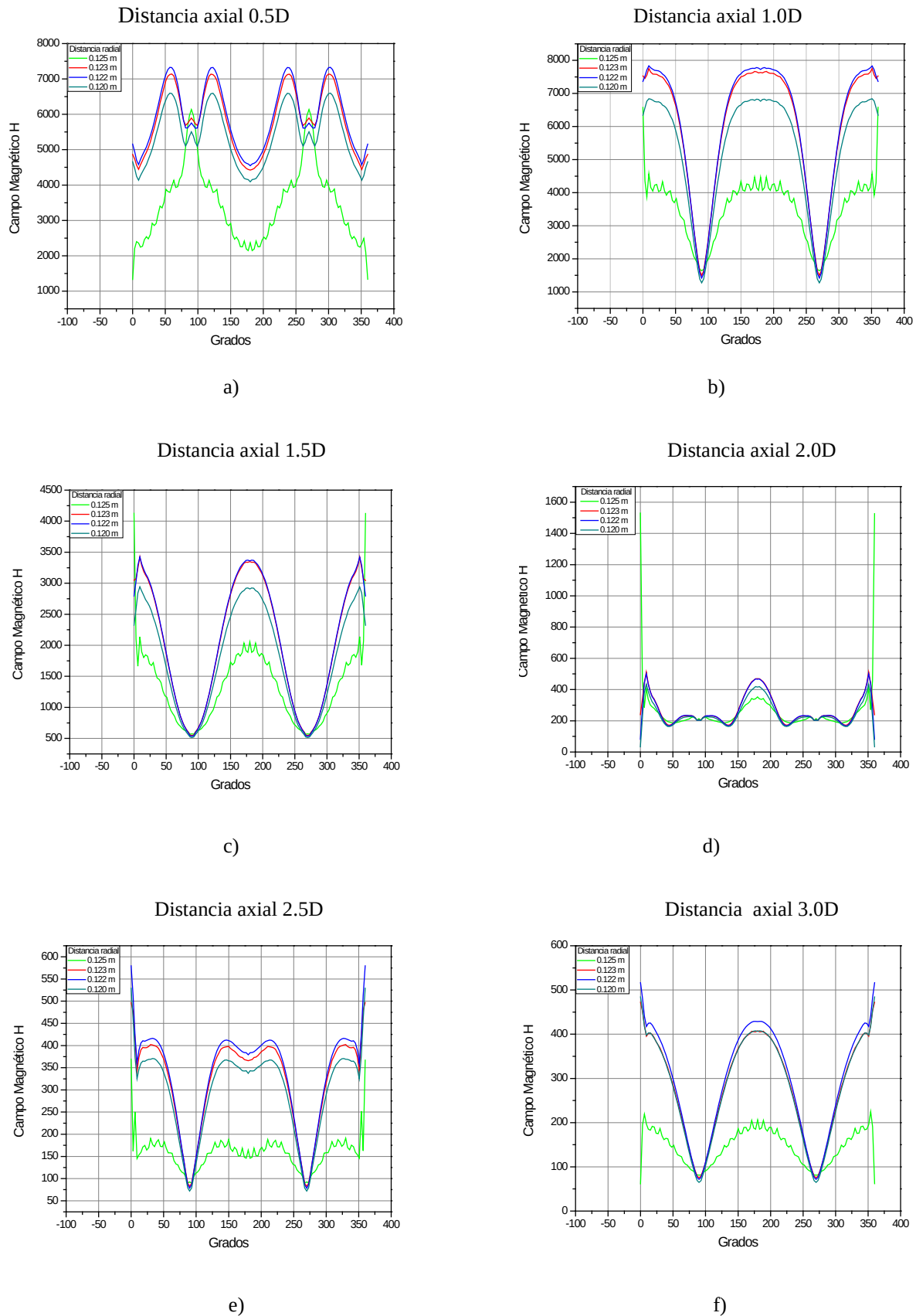


Figura 4.8. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 0° .

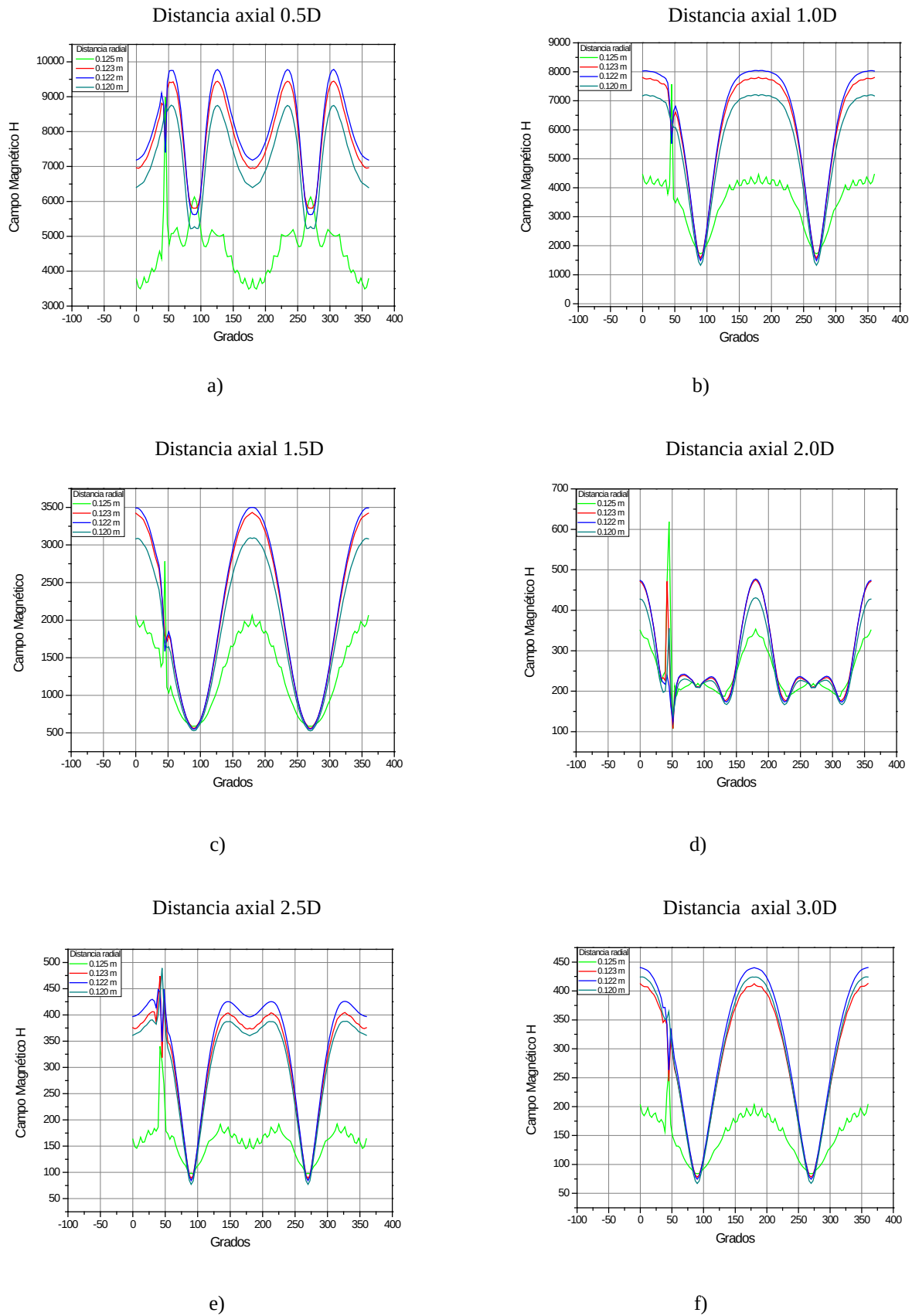


Figura 4.9. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 45° .

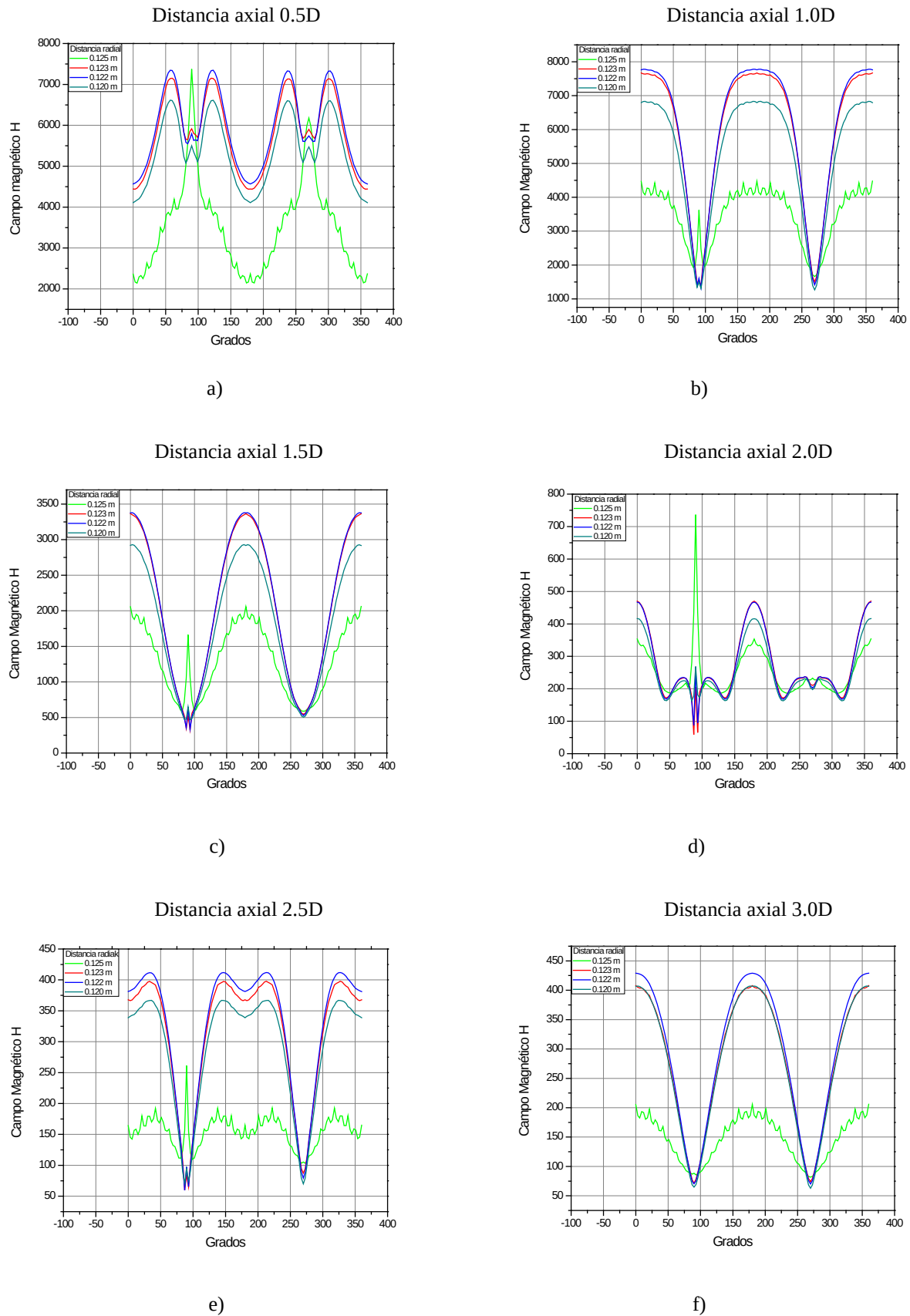


Figura 4.10. Comportamiento de H bajo la influencia de una corrosión a 90° .

El comportamiento de las fallas a las posiciones angulares de 0° , 45° y 90° y a la distancia radial de 0.125 m se muestran en la Figura 4.11, donde se pueden observar los picos debido a las corrosiones ubicadas en las posiciones angulares antes mencionadas y como cambia de manera repentina el comportamiento sinusoidal.

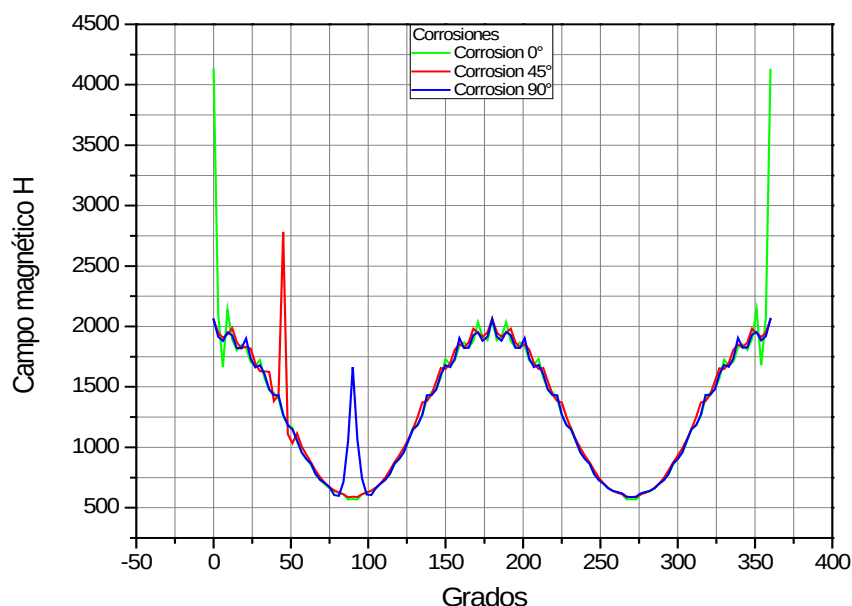


Figura 4.11. Variaciones de $\mathbf{H}$ debido a la corrosión.

4.3.2 Fugas

Para este tipo de falla presente en el ducto se muestra un incremento mucho mayor que el observado en la corrosión en las posiciones angulares de 0° , 45° y 90° . Este incremento aun mayor es por la abertura, que abarca todo el espesor del ducto, ya que las líneas de flujo que circulan sobre la región del aire en el interior del ducto tienden a buscar una salida. Los resultados del comportamiento de $\mathbf{H}$, se muestran en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

Como se puede notar el efecto de la fuga es muy evidente en las distintas posiciones axiales y ubicaciones angulares, la mejor distinción de la variación del comportamiento de $\mathbf{H}$ se observa en las dos posiciones axiales de 1.5D y 2.0D. Aprovechando el comportamiento sinusoidal a 1.5D se considera que es la mejor opción para la detección de este tipo de fallas y para llevar a cabo las consideraciones de las posiciones angulares.

Fuga localizada a 0° : A esta posición angular se evidencia claramente el efecto de la fuga, ya que muestra una mayor concentración de $\mathbf{H}$ en la región de la fuga y disminución en los lados.

Se obtiene una buena lectura a un sensorado cercano de la cavidad interna igual que en la corrosión a 0° . Por ello se utiliza la distancia radial de 0.125 m, el cual tiene un incremento aproximado 149.3% mayor que la amplitud de la onda localizada a 180° , ver Figura 4.12 c).

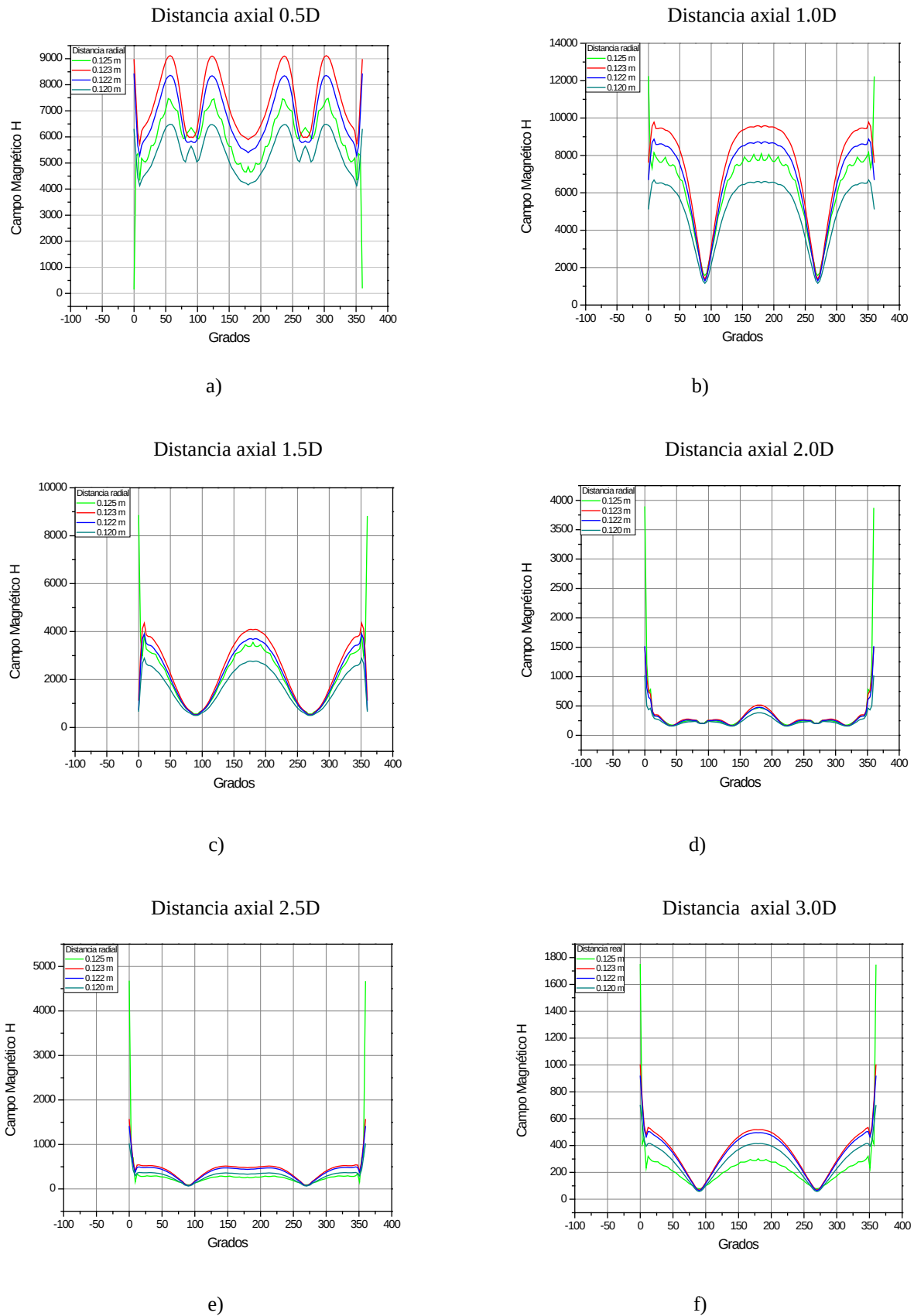


Figura 4.12. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 0° .

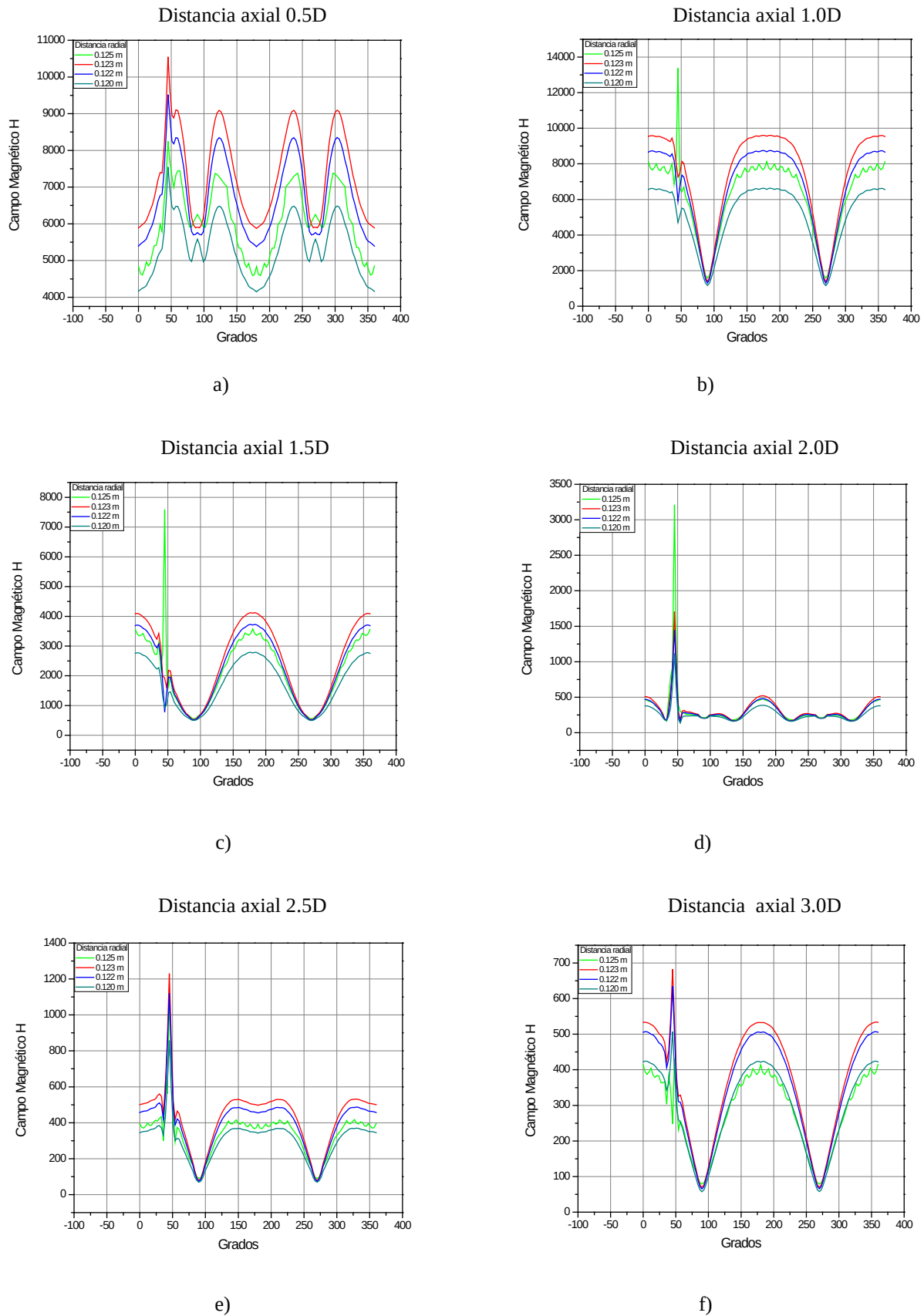


Figura 4.13. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 45° .

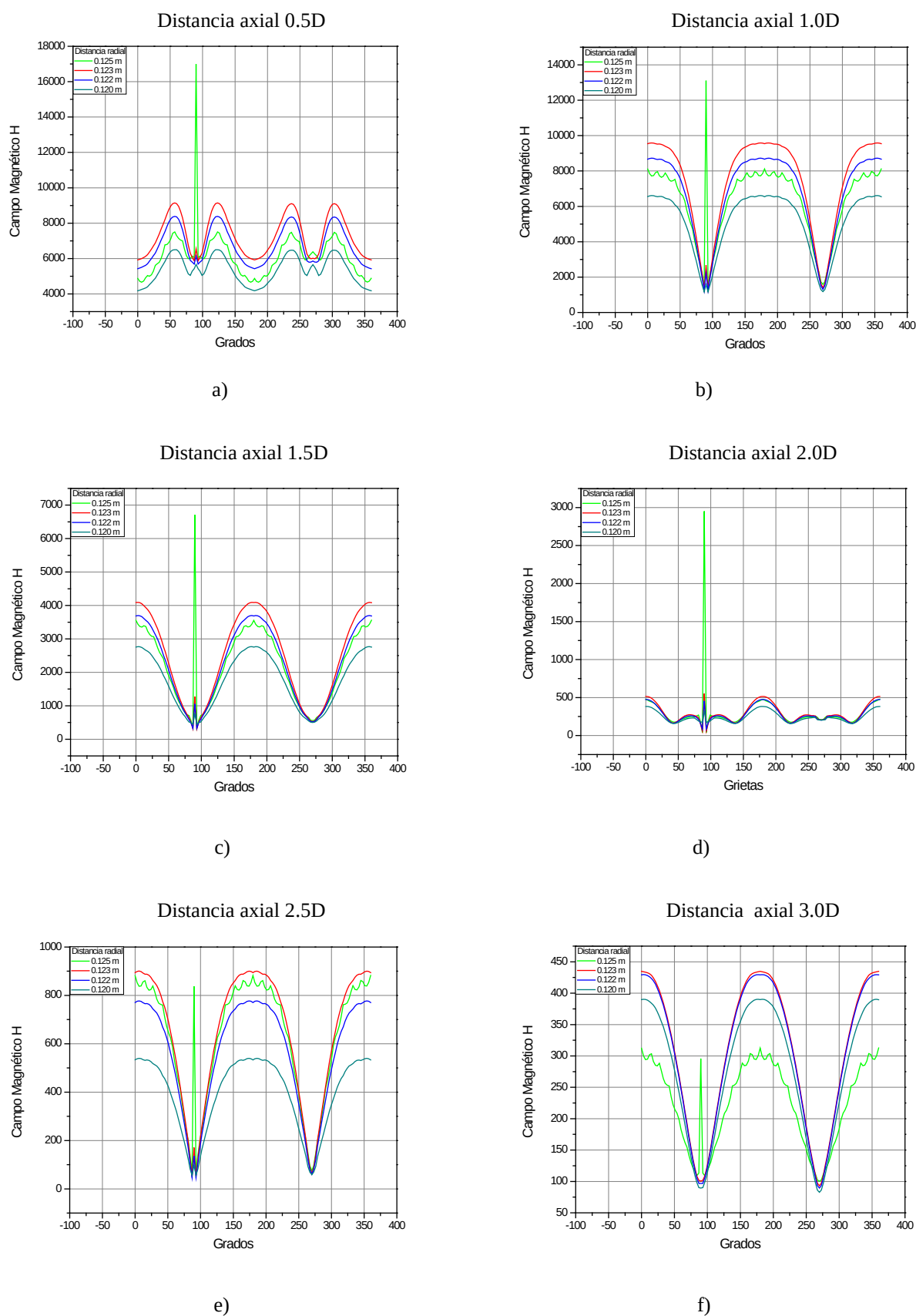


Figura 4.14. Comportamiento de H bajo la influencia de una fuga a 90° .

Fuga localizada a 45°: Para este caso se presenta el mismo comportamiento que el de la fuga a 0°, con un incremento en la zona más cercana y un decremento en las otras distancias radiales. Por ello se considera la distancia radial de 0.125 m, la cual tiene un incremento aproximado del 234.6% con respecto a la amplitud de la onda localizada a 135°, ver Figura 4.13 c).

Fuga localizada a 90°: Como la fuga en esta zona se ve afectada por el efecto del polo del imán como en el caso de la corrosión a 90° provoca una disminución gradual en zona del sensado por ello todas las distancias radiales son picos. Tomando en cuenta la distancia radial de 0.125 m, el incremento aproximado es de 1101.2 % con respecto a amplitud de la onda localizada a 270°, ver Figura 4.14 c).

El comportamiento de **H** debido a la fuga se muestra en la Figura 4.15, donde se observan las variaciones que provocan este tipo de defectos a una posición axial de 1.5D y distancia radial de 0.125 m. Estas variaciones son muy pronunciadas, ya que la fuga provoca una mayor concentración de las líneas de flujo.

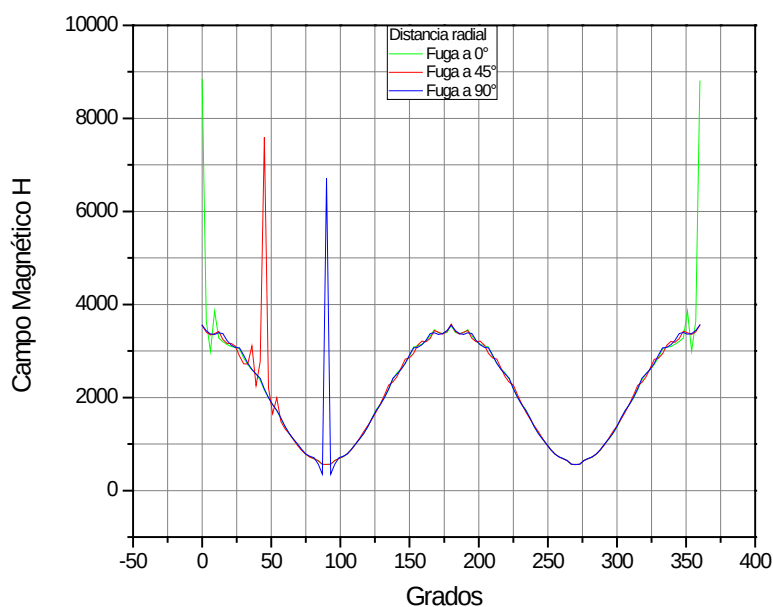


Figura 4.15. Comportamiento de **H** debido a la Fuga.

4.3.3 Grietas

En este tipo de defectos las variaciones son poco notorias, debido al tamaño de la grieta que se está considerando de la quinta parte del espesor y aproximadamente 0.9 mm de arco radial. El comportamiento de **H** ante este tipo de falla se muestra en las posiciones angulares de 0°, 45° y 90° en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18, respectivamente.

Dichos comportamientos son variantes para los distintos casos que se están considerando el efecto de la grieta es poco notorio para todos los casos en comparación a la corrosión y fuga. Aprovechando el efecto sinusoidal de la distancia axial 1.5D es más factible detectar el cambio de **H** en la gráfica.

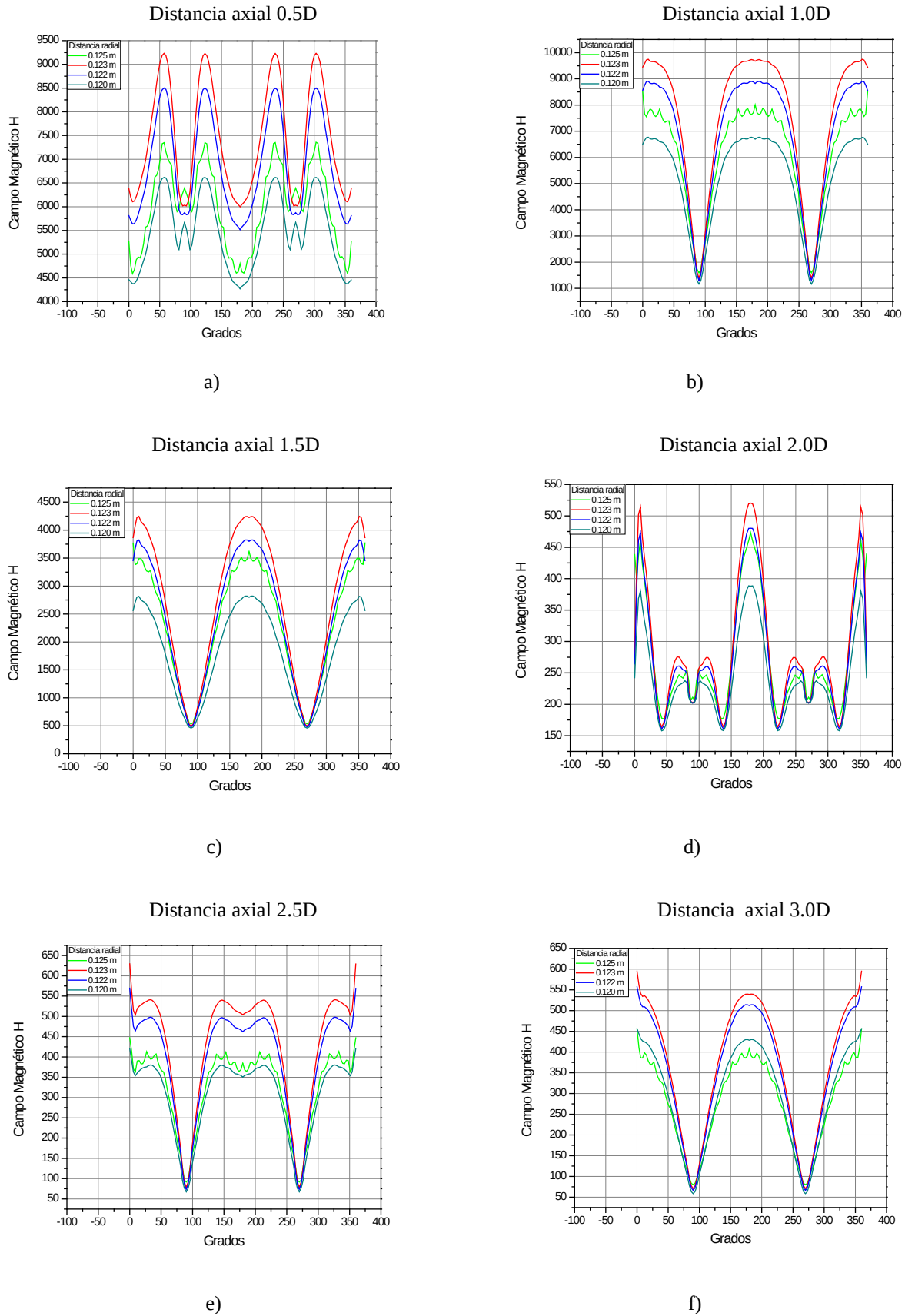


Figura 4.16. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 0° .

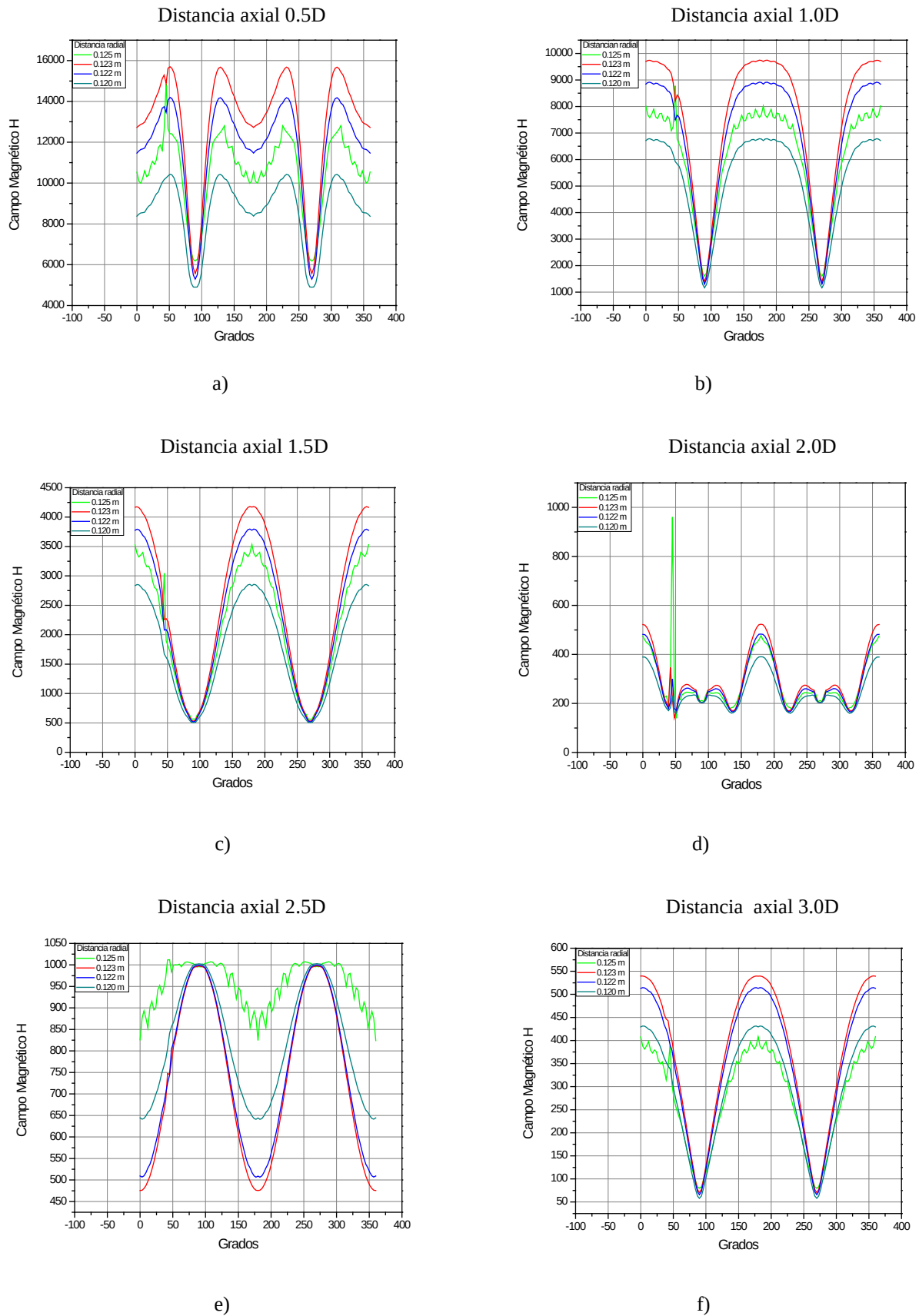


Figura 4.17. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 45° .

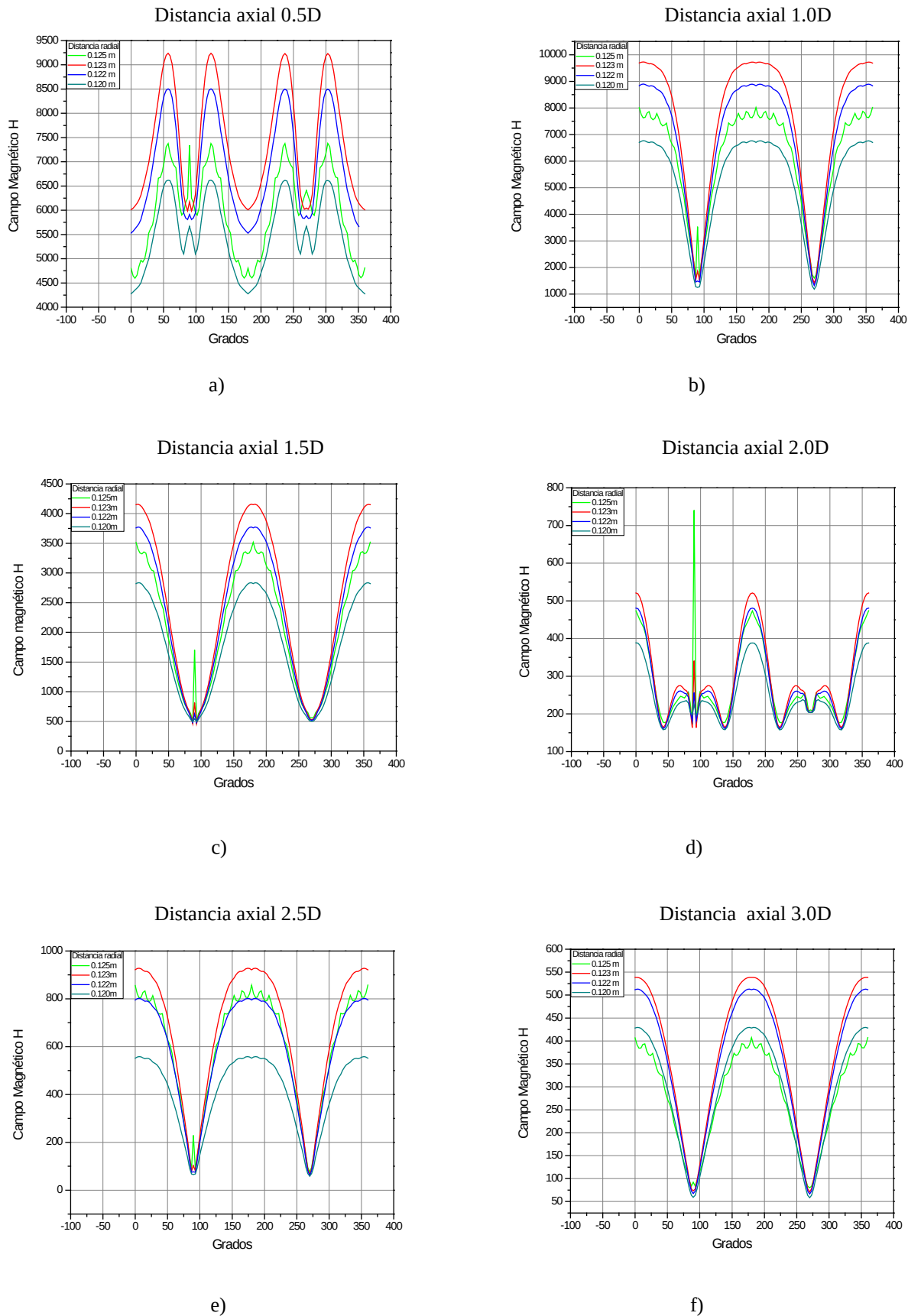


Figura 4.18. Comportamiento de H bajo la influencia de una grieta a 90° .

Grieta localizada a 0°: Se tiene los mismos comportamientos y efectos en el campo magnético que los enunciados en la corrosión y fuga a 0°, por ello se toma la distancia radial a 0.125 m ya que aporta una mejor lectura y cuyo incremento es de 4.18% respecto a la amplitud de la onda en 180°, ver Figura 4.16 c).

Grieta localizada a 45°: El efecto de la grieta es más evidente a una distancia radial de 0.125 m ya que las otras distancias radiales muestran pequeñas variaciones, el incremento que se tiene es del 35.94% respecto a la amplitud de onda ubicada a 135°, ver Figura 4.17 c).

Grieta localizada a 90°: Como se tiene el efecto del polo en la zona del sensado se toma en cuenta la distancia radial de 0.125 m ya que se observa con claridad la variación. El incremento que se presenta es aproximadamente del 48.5% de la amplitud de onda a 270°, ver Figura 4.18 c).

El comportamiento de **H** debido a la grieta se muestra en la Figura 4.19, donde se observan las variaciones que provoca este tipo de defectos, a una posición axial de 1.5D y distancia radial de 0.125 m.

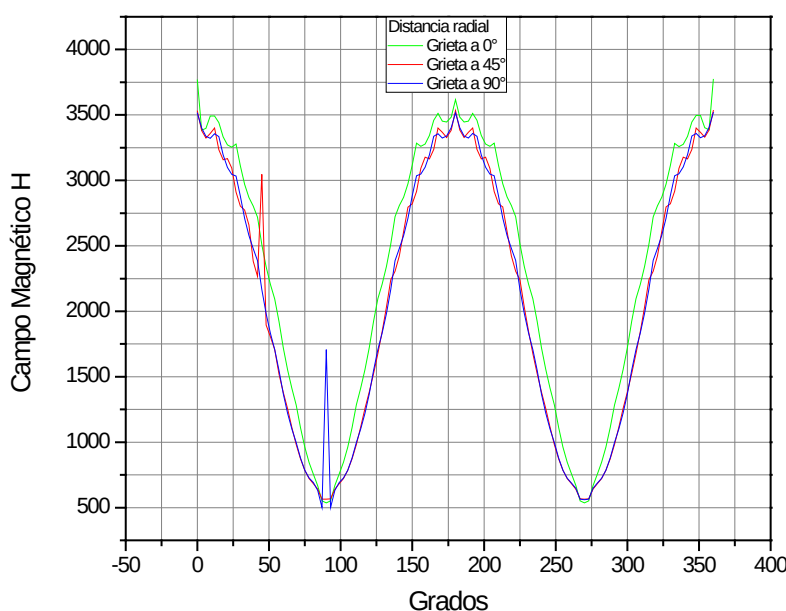


Figura 4.19. Comportamiento de **H** debido a la Grieta.

4.3.4 Incrustaciones

Este tipo de defectos pueden considerarse como materiales adheridos en la cavidad interna del ducto o bordes de mala soldadura, las variaciones en el comportamiento de **H** debido a esta variación se muestran como decrementos en la gráfica para las posiciones angulares de 0°, 45° y 90° mostrados en las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 respectivamente. Para en este caso, las simulaciones tomaron en cuenta que las incrustaciones son del *mismo* material que el del ducto.

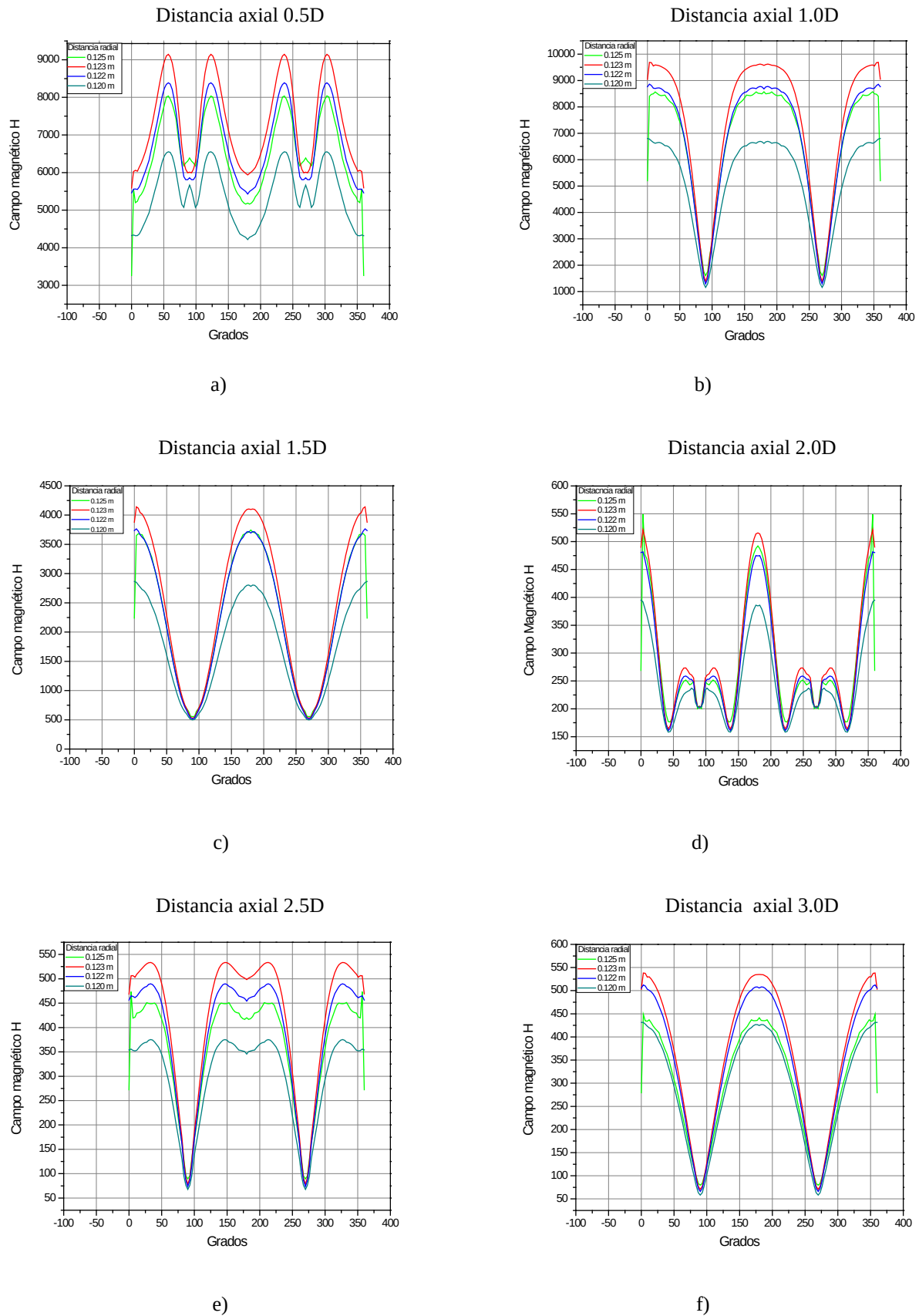


Figura 4.20. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 0° .

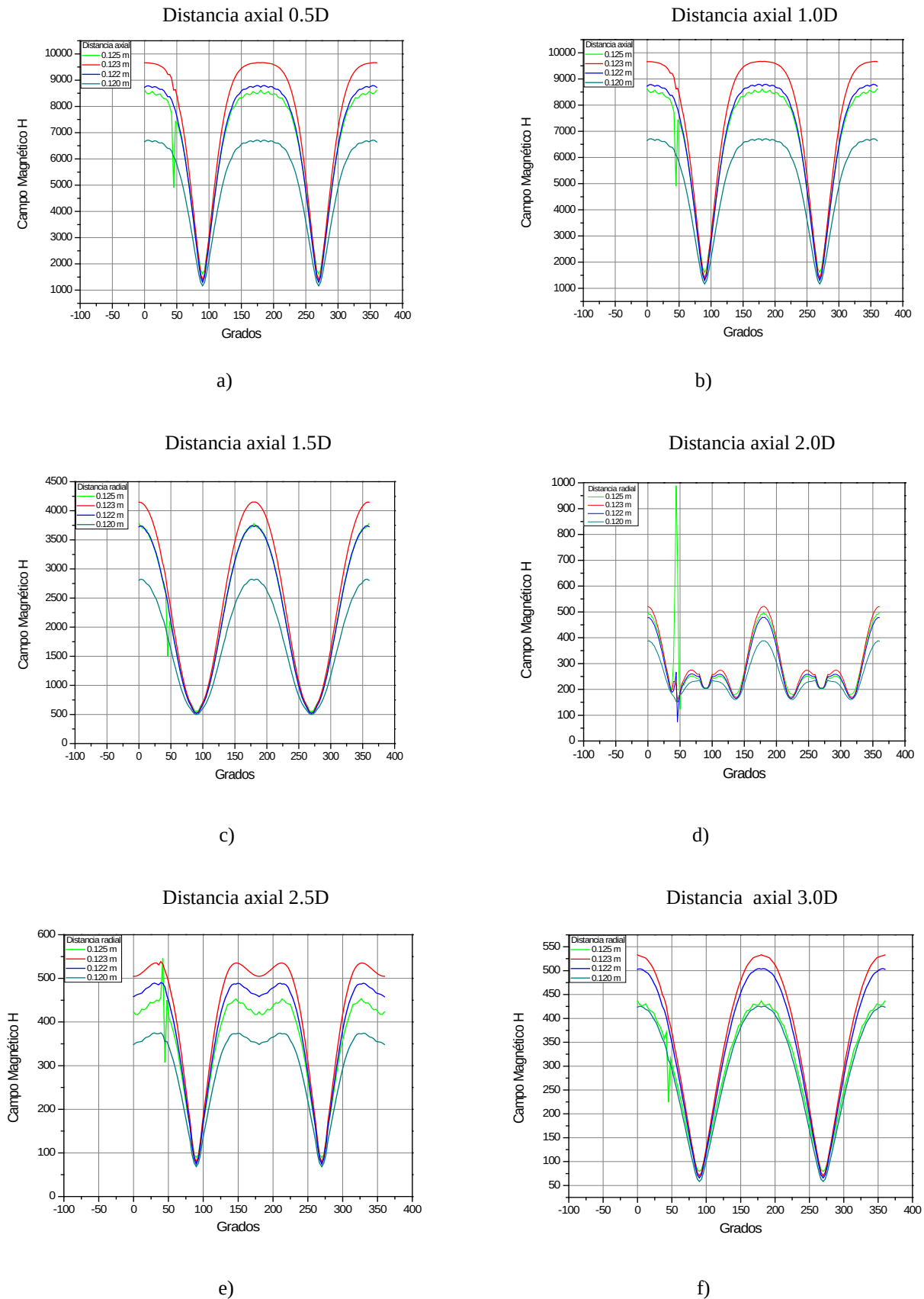


Figura 4.21. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 45° .

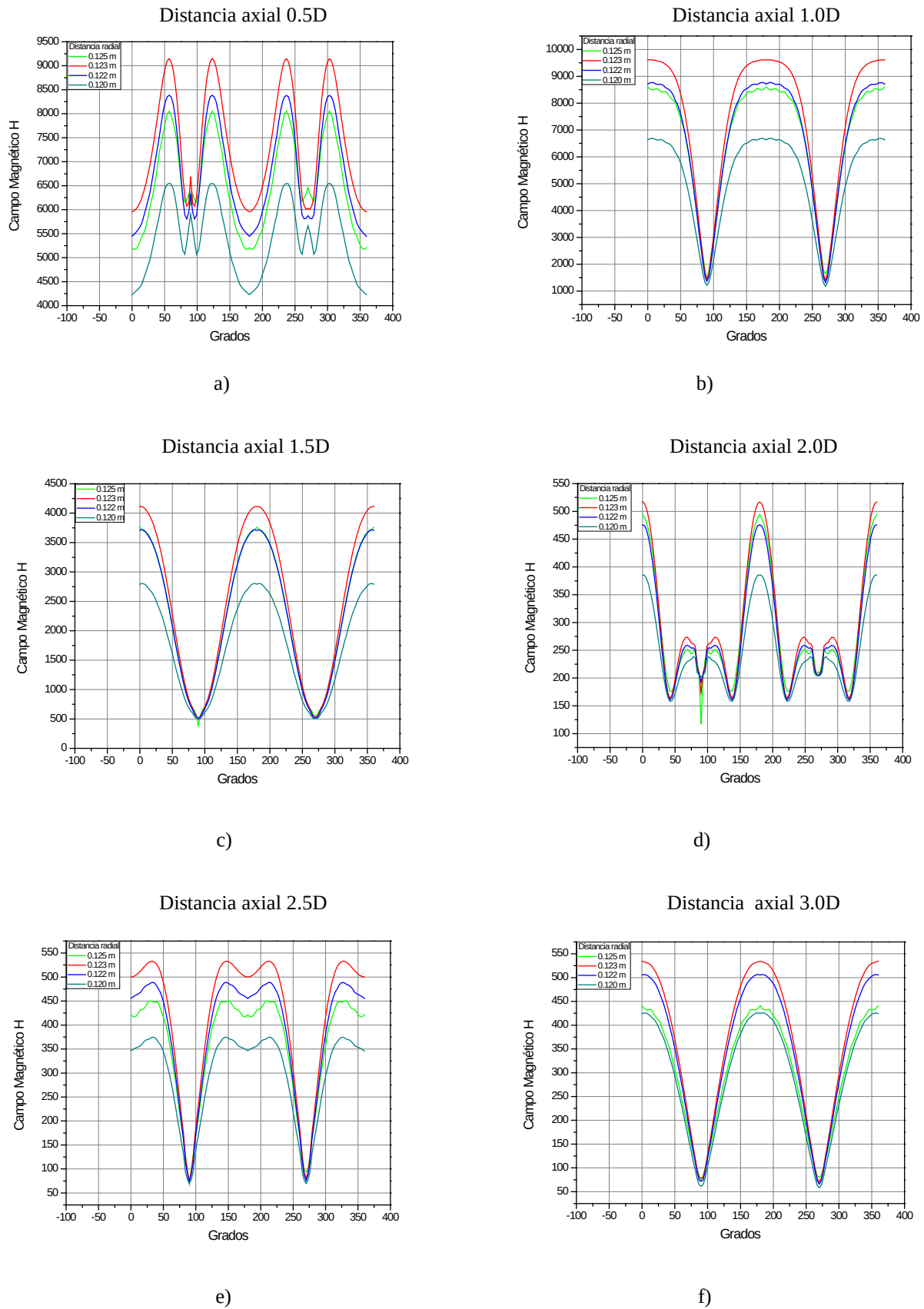


Figura 4.22. Comportamiento de H bajo la influencia de una incrustación a 90° .

Las variaciones que se presentan a los distintos grados son similares, ya que al tener un material sobre la cavidad interna del ducto, éste provoca un incremento en las líneas de flujo sobre la sección del material incrustado reduciendo en gran medida el valor de **H** sobre esa zona, provocando esta reducción o disminución tan remarcada sobre la mayor parte de las posiciones axiales y radiales del sensado. En este análisis se seguirá aprovechando el comportamiento sinusoidal de la distancia axial de 1.5D para el análisis.

Incrustación localizada a 0°: Puesto que todas las distancias radiales tienen el mismo comportamiento de decrementos a esta posición angular, se toma en cuenta la distancia radial de 0.125 m el cual es más notorio, para este caso se tiene un decremento de -40.2% respecto a la amplitud de onda a 180°, como se ve en la Figura 4.20 c).

Incrustación localizada a 45°: En este caso la variación sólo se ve presente a la distancia radial de 0.125, por ser la más cercana y detectar la variación **H**. El decremento que se presenta es -37.1% respecto a la amplitud de onda a 135°, ver Figura 4.21 c).

Incrustación localizada a 90°: La variación por el defecto es menos notoria por el efecto del polo aun así se ve presente la variación. El decremento a la distancia radial de 0.125 m fue de -30.3% respecto a la amplitud de onda ubicada a 270°, como se muestra en la Figura 4.22.

El comportamiento de **H** debido a la incrustación de muestra en la Figura 4.23, donde se observan las variaciones a la distancia axial de 1.5D y distancia radial de 0.125 m.

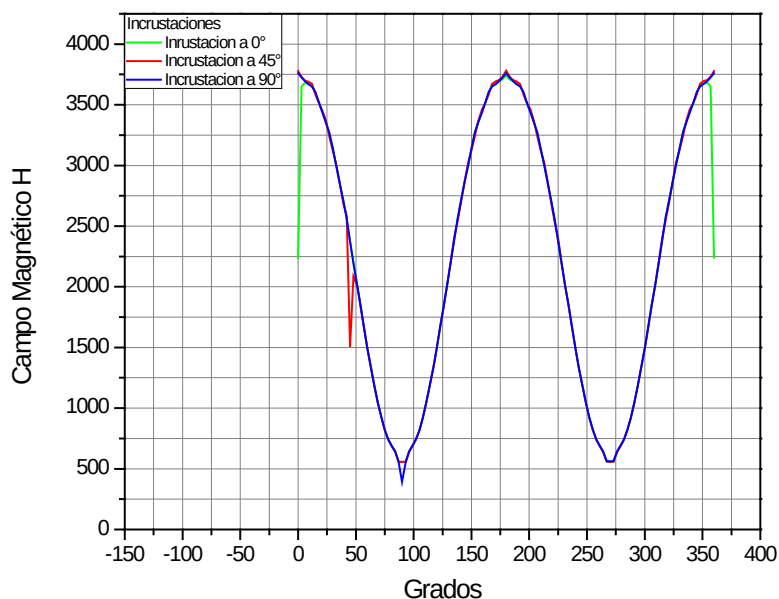


Figura 4.23. Comportamiento de **H** debido a la Incrustación.

4.4 Discusión de resultados

De acuerdo a todo el análisis en simulación realizado anteriormente se puede decir que, dependiendo del tipo de falla presente y ubicación angular, el comportamiento de H se ve afectado de manera particular. Esto es más notorio conforme se aleja de la posición del imán, pero también al alejarse demasiado empiezan a distorsionarse el comportamiento de H . Por ello, para la selección de la posición axial se tomó en cuenta una ubicación que permita denotar con mayor facilidad la variación de H ante la presencia de una falla. En este caso, la distancia axial a $1.5D$ presenta características similares para las distintas fallas; lo cual facilita la detección de la variación, que en este caso se presentan como valles para la incrustación e incrementos o picos para las otras fallas.

Las variaciones que se tienen a una medición de 0.125 m (distancia radial) de las distintas fallas, es provocado por el tipo de mallado (error numérico) que se está utilizando, ya que se tiene un cambio de frontera de un medio a otro (metal-aire), el cual se reduce utilizando un mallado más fino en dado caso que se desee tener una mejor precisión en esa parte del sensado.

Considerando la distancia axial de $1.5D$, las fallas como la *corrosión*, *grieta* y *fugas* tienen una característica similar en su comportamiento, la presencia de picos en la gráfica sinusoidal de H . La diferencia que se puede denotar entre estos tres casos de análisis es la magnitud del campo magnético H , en donde se pueden clasificar en un rango de magnitud para notar qué tipo de defecto está presente en el ducto.

Para considerar la presencia de una *corrosión* o *fuga* en el ducto se puede tomar como rango un incremento de 100% o mayor de la magnitud de H , en tanto que para la presencia de una *grieta* se pueden considerar un incremento menor al 100% , todas estas magnitudes dependen de la ubicación angular en la que se encuentre la falla para obtener el orden de magnitud.

Se puede tener una excepción como es el caso de la fuga, en donde se puede optar para su análisis la distancia axial a $2.0D$, ya que en esta distancia también se puede evidenciar el efecto de la falla en el comportamiento de la gráfica de H y presenta ondas más pequeñas que las que muestran las gráficas de la corrosión y grieta, debido a que se disminuyen las variaciones de los polos por la salida de las líneas de flujo en la región de la fuga.

Por último la *incrustación* en el ducto, se puede notar muy fácilmente debido a que este tiene un efecto muy particular de decremento (valle) en todas las posiciones angulares por el efecto que tiene el material extra al atraer las líneas de flujo sobre ella y disminuir drásticamente en esa zona el valor de H . Esto, a pesar de que el material de la incrustación es del mismo que la del ducto.

Conclusiones

En este trabajo se analizaron, modelaron y simularon los fenómenos de campo magnético de un imán estático en el interior de un ducto ferromagnético en condiciones nominales y en condiciones de falla.

La formulación de un modelo analítico que permita conocer el comportamiento del campo magnético en condiciones nominales y falla resulto comprobado, ya que la geometría del imán y la variación de flujo en la cavidad del ducto provocada por las variaciones geométricas debida a la falla dificulta el modelo analítico para toda la sección del ducto. Es por eso que en este trabajo se utilizó la caracterización utilizada de un circuito magnético para representar el modelo utilizado del imán y el ducto (región 0). Se formuló un modelo analítico a partir del cual se calculó el flujo magnético en el ducto y se comparó con el obtenido en el programa de simulación MEF dando un margen de error mínimo.

El modelado y simulación a través del MEF mostraron el comportamiento del campo magnético a 6 posiciones axiales y para cada posición axial a 4 distancias radiales en la cavidad interna del ducto para condiciones normales y condiciones de falla.

Se caracterizaron diversos tipos de falla en el ducto como: corrosión, fugas, grietas e incrustaciones, donde se obtuvo un patrón de comportamiento del campo magnético para cada una de ellas. Al obtener el patrón de comportamiento para condiciones nominales y condiciones de falla se notaron diferencias en las variaciones de campo magnético, debido a la presencia de variaciones geométricas, tienen efecto en el campo magnético. Para el análisis de estas fallas se consideró un imán en condiciones estáticas. Como el campo magnético generado no es uniforme, se presentan tres posiciones angulares que determinan las variaciones de alta (90°), media (45°) y baja (0°) concentración de campo magnético para todas las posiciones axiales consideradas.

De los resultados obtenidos en el comportamiento del campo magnético en condiciones nominales y condiciones de falla se concluyó lo siguiente:

- Es factible detectar la variación geométrica de material a través de este método ya que es sensible a cambios, en la Tabla C-1 se muestran los resultados obtenidos según el tipo de defecto, la posición axial se puede sentir una mayor variación del campo magnético.

Defecto	Distancia axial	Separación (gap)
Corrosión	1.5D	2 mm
Fuga	1.5D ó 2.0D	2 mm
Grieta	1.5D	2 mm
Incrustaciones	1.5D	2 mm

Tabla C-1. Ubicación axial y el gap para la detección de fallas.

- Dependiendo del tipo de falla presente, el comportamiento del campo magnético H se comporta de manera distinta, para cada tipo de falla presentan incrementos o decrementos.
- Al considerar las fallas individualmente se puede utilizar Tabla C-1 para notar la variación del campo magnético. En tanto al considerar en conjunto todas las variaciones *corrosión, fuga, grieta*

e incrustaciones en el ducto se recomienda el uso de la distancia axial de $1.5D$ y un gap de 2mm ya que para estas condiciones se obtienen buenos resultados.

- Otro punto a resaltar es que entre más cercano se encuentre el sensor de la superficie interna de la tubería permite una mejor detección de las variaciones.

Aportaciones

Con este trabajo de tesis se aportó lo siguiente:

- Modelo teórico para calcular el flujo magnético en la tubería en la región del imán.
- Análisis de una tubería ferromagnética bajo diversas condiciones de falla por el método de Flujo Magnético.
- Análisis de la ubicación adecuada de los sensores para una lectura apropiada del campo magnético.
- Caracterización del comportamiento del Campo Magnético en condiciones nominales y condiciones de falla.

Trabajo Futuro

Existen muchas vertientes que se pueden desarrollar a partir de este trabajo de tesis, algunas de éstas son:

El desarrollo de un prototipo físico para analizar el campo magnético generado por el imán y compararlos con los resultados del MEF.

Analizar, modelar y simular los fenómenos de campo magnético con el imán en movimiento rotatorio. Lo anterior para tratar de uniformizar el campo magnético en el ducto. También se considera implementar otra configuración con mayor número de pares de polos.

El análisis de fallas externas y/o una combinación de fallas externas e internas para mostrar la variación que presenta el campo magnético con esta configuración.

Bibliografía

- [1] Álvaro García Sánchez “Programación del Transporte de Hidrocarburos por Oleoductos Mediante la Combinación de Técnicas Metaheurísticas y simulación”, Universidad Politécnica de Madrid, 2007, Madrid España.
- [2] Francisco A. Rumiche P. y J. Ernesto Indacochea B, “Estudio de Caso de Fallas y Accidentes en Gaseoductos y Oleoductos”, Joining Science & Advanced Materials Research Laboratory, pp.1-2, 2007.
- [3] Introduction to Nondestructive Testing by NDT Education, www.asnt.org, Fecha de consulta Enero 2012.
- [4] Raúl Armando León Buenfil, José Masó Mortera, “Evaluación del Gasoducto de 36"Ø Abkatun-Pol-Atasta Mediante El Análisis de Integridad”, Tesis de Maestría en Gerencia de Proyectos de Ductos, Universidad de las Américas Puebla, pp. 135-136, 2002.
- [5] Daniel Perera Gerónimo, Trabajo Recepcional, “Manual de Introducción al Ultrasonido Industrial”, Universidad Tecnológica de Tabasco, pp. 8,13. Septiembre 2008.
- [6] “Inspección de Ductos de Transporte Mediante Equipos Instrumentados”, pp. 9, No. de Documento NRF – 060 – PEMEX – 2006.
- [7] Sistemas de Inspección de Tuberías, “Generalidades de los Sistemas de Inspección NDT, FUSION”, Nota Técnica No. 135, División de Tecnologías Aplicadas – Fusión Sudamericana, Octubre 2003.
- [8]. Ing. Mario A. Cárdenas Ruiz, “Análisis de comparativa de Evaluación de Defectos en Ductos entre Estudios Realizados con Equipos Instrumentados Inteligentes de Segunda y Tercera Generación”, Tesis de Maestría en Ing. Mecánica, Instituto Politecnico Nacional Méxicio D.F., pp. 46, 2007.
- [9] Anders Volland, Ole Øystein Knusden, Rhoj Jhonsen, Øystein Sæxik, “Steel Pipelines-states of the art for internal condition monitoring and inspection technologies”, Norwegian Marine Tecnology Research Institute, pp 24-34, Febrero 2010.
- [10] Modern Methods of in line Inspection, Technical Means and their Aplication on Transmission Pipelines, Transneft Join-Stock Company Technical Diagnostics Centre Join-Stock Company TDC Diascan, Fecha de consulta Enero 2012.
- [11] Ing. Alfonso R. García Cueto e Ing. Martha Nohemi Torres Cuervo, “Análisis del Control de la Calidad a Ductos Inspeccionados por la Herramienta Inteligente usando el Programa Ultrapipe”, PEMEX exploración y producción, pp. 4-5, 1999.
- [12] LI Xiang. LI Xunbo, CHEN Liang, QIN Guangxu, FENG Peifu, HUANG Zuoying, “Steel Pipeline Testing Using Magnetic Flux Leakage Method”, Science and Technology, IEEE, pp. 1-3, Agosto 2008.
- [13] J. Bruce Nestleroth, “Design of a Rotating Permanent Magnet Inspection Exciter”, NETL Award No. DE-FC26-03NT41881, Batelle-Columbus, pp. 7-14, Mayo 2006.
- [14] Leonard Eyges, “The Classical Electromagnetic Field”, 1ra. Edición, Morton Hamermesh, pp. 113, USA.
- [15] Arthur F. Kip, Fundamentos de Electricidad y Magnetismo, 1ra. Edición, McGraw-Hill, pp. 231-236, 1972, México.

-
- [16] Oleg D. Jefimenko "Electricity and Magnetism", Second Edition, pp. 454-478, 1989 USA.
- [17] Aleksandr Mousatov, Vladimir Shevnin, Edgar Nakamura, Igor Modin, "Inspección y Control Periódico de Ductos Aplicando Mediciones del Campo Electromagnético Producido por Sistemas de Protección Catódica", Congreso Internacional de Ductos, pp. 1-3, Noviembre 2001.
- [18] Roger T Fenner, "Finite Element Methods for Engineers", Imperial College Press, pp. 1-2, 1996, Massachusetts 01923, USA.
- [19] Seed Moaveni, "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS", Prentice Hall, PP 5-6, 1999, New Jersey 07458, USA.
- [20] Josep Sarrate, Ramón Calriso, "El Método de los Elementos Finitos en Problemas Electromagnéticos: Planteamientos y Aplicaciones", Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería, vol. 17, No. 1, pp. 219-248.
- [21] Bruce Nestleroth y Rick Davis, "Rotating Permanent Magnetic Exciter for Pipeline Inspection", Battelle The Business Innovation.
- [22] G. Dobmann, O. A. Barbian y H. Willems, "State of the art In-Line Nondestructive Weld Inspection of Pipelines by Ultrasonics", Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 43, No. 11, pp. 755 2007.

Anexos

Anexo A

Diámetro Nominal de Tuberías de Acero al Carbono



TUBERIA DE ACERO AL CARBONO **ASTM A53 / A106**

Area de La Superficie del Tubo

Diámetro Nominal NPS DN		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		Área de La Superficie Exterior en mt ² por metro lineal de tubería
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	0.067
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	0.084
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	0.105
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	
1-1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	STD	40	2.27	3.39	0.132
				0.191	4.85	XS	80	3.00	4.47	
1-1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	STD	40	2.72	4.05	0.152
				0.200	5.08	XS	80	3.63	5.41	
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	STD	40	3.65	5.44	0.190
				0.218	5.54	XS	80	5.02	7.48	
2-1/2	65	2.875	73.03	0.203	5.16	STD	40	5.79	8.63	0.229
				0.276	7.01	XS	80	7.66	11.41	
				0.375	9.52	-	160			
				0.552	14.02	XXS	-			
3	80	3.500	88.90	0.125	3.18	-	-	4.51	6.72	0.279
				0.156	3.96	-	-	5.57	8.29	
				0.188	4.78	-	-	6.65	9.92	
				0.216	5.49	STD	40	7.58	11.29	
				0.250	6.35	-	-	8.68	12.93	
				0.281	7.14	-	-	9.66	14.40	
4	100	4.500	114.30	0.300	7.62	XS	80	10.25	15.27	0.359
				0.125	3.18	-	-	5.84	8.71	
				0.156	3.96	-	-	7.24	10.78	
				0.188	4.78	-	-	8.66	12.91	
				0.219	5.56	-	-	10.01	14.91	
				0.237	6.02	STD	40	10.79	16.07	
				0.250	6.35	-	-	11.35	16.90	
				0.281	7.14	-	-	12.66	18.87	
				0.312	7.92	-	-	13.98	20.78	
				0.337	8.56	XS	80	14.98	22.32	
5	125	5.563	141.29	0.438	11.13	-	120	19.00	28.32	0.444
				0.531	13.49	-	160	22.51	33.54	
				0.674	17.12	XXS	-	27.54	41.03	
				0.188	4.78	-	-	10.79	16.09	
				0.219	5.56	-	-	12.50	18.61	
				0.258	6.55	STD	40	14.62	21.77	
6	150	6.625	168.28	0.281	7.14	-	-	15.85	23.62	0.529
				0.312	7.92	-	-	17.50	26.05	
				0.344	8.74	-	-	19.17	28.57	
				0.375	9.52	XS	80	20.78	30.94	
				0.188	4.78	-	-	12.92	19.27	
				0.219	5.56	-	-	14.98	22.31	
				0.250	6.35	-	-	17.02	25.36	
				0.280	7.11	STD	40	18.97	28.26	
				0.312	7.92	-	-	21.04	31.32	
				0.344	8.74	-	-	23.08	34.39	
6	150	6.625	168.28	0.375	9.52	-	-	25.02	37.28	0.529
				0.432	10.97	XS	80	28.57	42.56	
				0.562	14.27	-	120	36.39	54.20	
				0.719	18.26	-	160	45.35	67.56	
				0.864	21.95	XXS	-	53.16	79.22	

Tel/Fax. (0251) 269-2998, 269-2487
Cel. (0414) 533-5833

Zona Industrial Carrera 2 Modulo E , Barquisimeto



TUBERIA DE ACERO AL CARBONO
ASTM A53 / A106
Area de La Superficie del Tubo

Diámetro Nominal		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		Área de La Superficie Exterior en mt2 por metro lineal de tubería
NPS	DN			Pulgadas	Milímetros	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	(in.)	(mm.)					
8	200	8.625	219.08	0.188	4.78	-	-	16.94	25.26	0.688
				0.203	5.16	-	-	18.26	27.22	
				0.219	5.56	-	-	19.66	29.28	
				0.250	6.35	-	20	22.36	33.31	
				0.277	7.04	-	30	24.70	36.81	
				0.312	7.92	-	-	27.70	41.24	
				0.322	8.18	STD	40	28.55	42.55	
				0.344	8.74	-	-	30.42	45.34	
				0.375	9.52	-	-	33.04	49.20	
				0.406	10.31	-	60	35.64	53.08	
				0.438	11.13	-	-	38.30	57.08	
				0.500	12.70	XS	80	43.39	64.64	
				0.594	15.09	-	100	50.95	75.92	
				0.719	18.26	-	120	60.71	90.44	
				0.812	20.62	-	140	67.76	100.92	
				0.875	22.22	XXS	-	72.42	107.88	
				0.906	23.01	-	160	74.69	111.27	
10	250	10.750	273.05	0.188	4.78	-	-	21.21	31.62	0.858
				0.203	5.16	-	-	22.87	34.08	
				0.219	5.56	-	-	24.63	36.67	
				0.250	6.35	-	20	28.04	41.75	
				0.279	7.09	-	-	31.20	46.49	
				0.307	7.80	-	30	34.24	51.01	
				0.344	8.74	-	-	38.23	56.96	
				0.365	9.27	STD	40	40.48	60.29	
				0.438	11.13	-	-	48.19	71.87	
				0.500	12.70	XS	60	54.71	81.52	
				0.594	15.09	-	80	64.43	95.97	
				0.719	18.26	-	100	77.03	114.70	
				0.844	21.44	-	120	89.29	133.00	
				1.000	25.40	XXS	140	104.13	155.09	
				1.125	28.57	-	160	115.65	172.21	
12	300	12.750	323.85	0.203	5.16	-	-	27.20	40.55	1.017
				0.219	5.56	-	-	29.31	43.63	
				0.250	6.35	-	20	33.38	49.71	
				0.281	7.14	-	-	37.42	55.75	
				0.312	7.92	-	-	41.45	61.69	
				0.330	8.38	-	30	43.77	65.18	
				0.344	8.74	-	-	45.58	67.90	
				0.375	9.52	STD	-	49.52	73.78	
				0.406	10.31	-	40	53.52	79.70	
				0.438	11.13	-	-	57.59	85.82	
				0.500	12.70	XS	-	65.42	97.43	
				0.562	14.27	-	60	73.15	108.92	
				0.688	17.28	-	80	88.63	132.04	
				0.844	21.44	-	100	107.32	159.86	
				1.000	25.40	XXS	120	125.49	186.91	
				1.125	28.57	-	140	139.68	208.00	
				1.312	33.32	-	160	160.27	238.68	



TUBERIA DE ACERO AL CARBONO
AS1M A53 / A106
Area de La Superficie del Tubo

Diámetro Nominal NPS DN		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		Área de La Superficie Exterior en mt2 por metro lineal de tubería
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	
14	350	14.00	355.60	0.250	6.35	-	10	36.71	54.69	1.117
				0.281	7.14	-	-	41.17	61.35	
				0.312	7.92	-	20	45.61	67.90	
				0.344	8.74	-	-	50.17	74.76	
				0.375	9.52	STD	30	54.57	81.25	
				0.438	11.13	-	40	63.44	94.55	
				0.469	11.91	-	-	67.78	100.94	
0.500	12.70	XS	-	72.09	107.39					
16	400	16.00	406.40	0.250	6.35	-	10	42.05	62.64	1.277
				0.281	7.14	-	-	47.17	70.30	
				0.312	7.92	-	20	52.27	77.83	
				0.344	8.74	-	-	57.52	85.71	
				0.375	9.52	STD	30	62.58	93.17	
				0.438	11.13	-	-	72.80	108.49	
				0.469	11.91	-	-	77.79	115.86	
0.500	12.70	XS	40	82.77	123.30					
18	450	18.000	457.20	0.250	6.35	-	10	47.39	70.60	1.436
				0.281	7.14	-	-	53.18	79.24	
				0.312	7.92	-	20	58.94	87.75	
				0.344	8.74	-	-	64.87	96.66	
				0.375	9.52	STD	-	70.59	105.10	
				0.406	10.31	-	-	76.29	113.62	
				0.438	11.13	-	30	82.15	122.43	
0.469	11.91	-	-	87.81	130.78					
0.500	12.70	XS	-	93.45	139.20					
20	500	20.000	508.00	0.250	6.35	-	10	52.73	78.55	1.596
				0.281	7.14	-	-	59.18	88.19	
				0.312	7.92	-	-	65.60	97.67	
				0.344	8.74	-	-	72.21	107.60	
				0.375	9.52	STD	20	78.60	117.02	
				0.406	10.31	-	-	84.96	126.53	
				0.438	11.13	-	-	91.51	136.37	
0.469	11.91	-	-	97.83	145.70					
0.500	12.70	XS	30	104.13	155.12					
24	600	24.000	609.60	0.250	6.35	-	10	63.41	94.46	1.915
				0.281	7.14	-	-	71.18	106.08	
				0.312	7.92	-	-	78.93	117.51	
				0.344	8.74	-	-	86.91	129.50	
				0.375	9.52	STD	20	94.62	140.88	
				0.406	10.31	-	-	102.31	152.37	
				0.438	11.13	-	-	110.22	164.26	
				0.469	11.91	-	-	117.86	175.54	
				0.500	12.70	XS	-	125.49	186.94	
0.562	14.27	-	30	140.68	209.50					

Tolerancias dimensionales:

Espesor: $\pm 12.5\%$ de espesor nominal en cualquier punto del tubo.

Peso: $\pm 10\%$ del paquete de tubos con diámetro menor o igual a 4" (114.3mm) o tubos individuales con diámetro nominal mayor a 4" (114.3mm)

Diámetro externo: Para diámetro menores o iguales a 1-1/2" (48.3mm) +0.016 pulg (+0.40mm)

Para diámetro mayores o iguales a 2" (60.3mm): $\pm 1\%$

Anexo B

Propiedades de una Barra Magnética de Neodymiun Hierro-Boro

Anexo B-1

Fuerza Coercitiva Barra Magnética de Neodymium Hierro-Boro

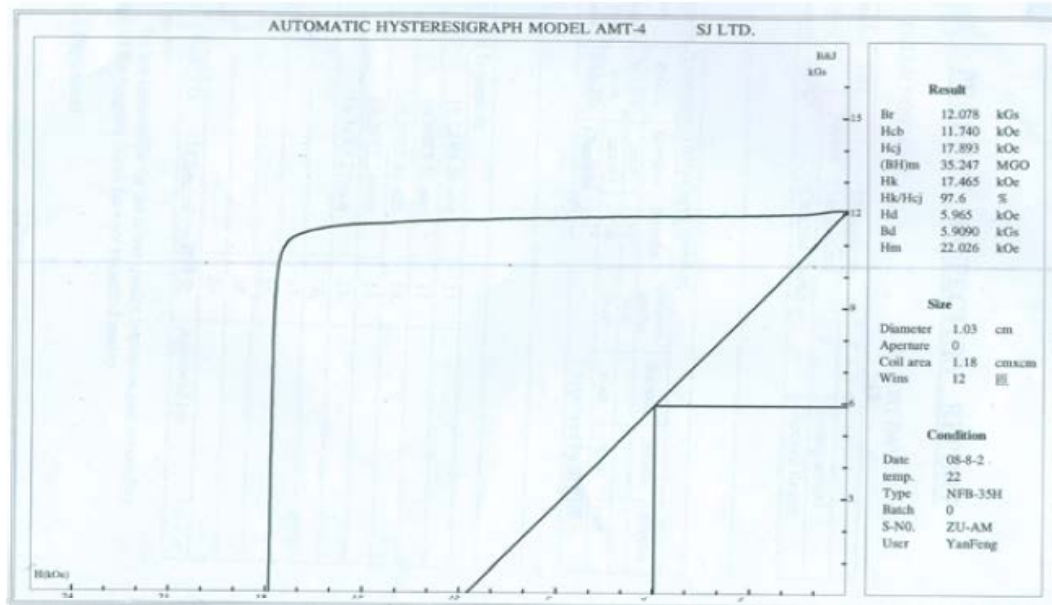
Neodymium 35H

Technical Data

Update 09 August 2011

Discs	Cylinders	Rings	Cuboids	Cubes	Balls	Discs w.sunk	Segments
-------	-----------	-------	---------	-------	-------	--------------	----------

BH-diagram (de-magnetisation curve)



ENERGY PRODUCT = $H_d \cdot B_d = 35$ Mega Gauss * Oersted (MGO)

Grade	35H	
Residual Induction Br	11.7-12.2 (1170-1220)	KG (mT)
Coercive Force Hcb	10.9 (868)	kOe(KA/m)
Intrinsic Coercive Force Hcj	17.0 (1353)	kOe(KA/m)
Energy Product BHmax	33-36 (263-287)	MGO(KJ/m3)
Max. Operating Temp.	120	°C

For the description of the properties of magnets practical and theoretical comparisons need to be done.

Magnetic materials preferably are conditioned and measured in electro magnetic fields.

The BH-diagram is used to determine a characteristic figure - the so called ENERGY PRODUCT : $BH_{max} = \text{Mega Gauss} \cdot \text{Oersted (MGsOe or MGO)}$

This regards to the largest possible rectangle area below the Br/Hcb-curve.

For e.g. Neodymium N45 it is 45 MGO.

The values in table (e.g. 43...46) relate to the tolerances in production.

The BH-Diagramm shows how strong an electro magnetic field (H) must be in order de-magnetize a permanent magnet with a field (B).

N35	PDF
N38	PDF
N40	PDF
N42	PDF
N45	PDF
N48	PDF
N50	PDF
N52	PDF
35M	PDF
38M	PDF
40M	PDF
42M	PDF
48M	PDF
50M	PDF
35H	PDF
38H	PDF
40H	PDF
42H	PDF
45H	PDF
48H	PDF
35SH	PDF
38SH	PDF
42SH	PDF
45SH	PDF
28UH	PDF
30UH	PDF
33UH	PDF
35UH	PDF
38UH	PDF
40UH	PDF

Anexo B-2

Permeabilidad Magnética de una Barra Magnética de Neodymium Hierro-Boro



[Profile](#) | [Assemblies](#) | [Equipment](#) | [Glossary](#) | [Products](#) | [Contact](#) | [Home](#)

1.NdFeB magnet is mainly made of Neodymium, Iron and Boron,with excellent magnetic property, abundant raw material and reasonable prices.NdFeB Magnet can be used as an ideal magnet in mini-motor, Permanent magnetic resonance, sound device magnetic suspension system,magnetic transmission machine and iatrical apparatus and etc.For NdFeB,its surface is usually treatd with some special methods.The surface treatment method include Zine, Nickel, Tin, Silver, Gold plating, Phosphor and Spray Epoxy Resin etc.

Physical Properties :						
Temp.Coeff of Br: -0.11%/℃		Temp.Coeff of iHc: -0.60%/℃			Density: 7.3-7.5g/cm ³	
Electrical Resistivity:144μQ/cm		Vickers Hardness: 600Hv			Flexural Strength: 25kg/mm ²	
Tensile Strength: 8.0kg/mm ²		Coeff of Thermal Expansion: 4*10 ⁻⁶ /℃			Specific Heat:0.12kCal/(kg.℃)	
Poisson's Ratio: 0.24		Compressibility: 9.8x10 ⁻¹² m ² /N			Curie Temperature:310℃-340	
Thermal Conductivity: 7.7kCal(m.h.℃)		Yong's Modulus 1.6x10 ¹¹ N/m ²			Rigidity 0.64N/ m ²	
Magnetic Characteristic :						
Material Code		Remanence	Coercivity force	Intrinsic coercivity force	Maximum energy product	Maximum operating temperature
NdFeB		Br	bHC	iHc	(BH)max	TW
		KGs	KOe	Koe	MGOe	
	N-30	10.8-11.5	9.8-10.5	≥12	28-31	80
	N-33	11.3-11.7	10.0-11.1	≥12	31-33	80
	N-35	11.7-12.3	10.7-12.0	≥12	33-36	80
	N-38	12.1-12.7	11.1-12.4	≥12	36-39	80
	N-40	12.5-13.1	11.5-12.8	≥12	38-41	80
	N-42	12.9-13.5	11.5-13.2	≥12	40-43	80
	N-43	13.0-13.3	10.5-11.0	≥12	41-43	80
	N-45	13.3-13.9	11.5-13.6	≥12	43-46	80
	N-48	13.7-14.3	11.5-14.0	≥12	46-49	80
	N-33M	11.3-11.9	10.3-11.6	≥14	31-33	80
	N-35M	11.7-12.3	10.7-12	≥14	33-36	80
	N-38M	12.1-13.1	11.1-12.4	≥14	36-39	80
	N-40M	12.5-13.2	11.5-12.8	≥14	38-41	80
	N-42M	12.9-13.5	11.9-13.2	≥14	40-43	80
	N-45M	13.3-13.9	12.3-13.6	≥14	43-46	80
	N-27H	10.2-11.0	9.6-10.5	≥17	25-28	100
	N-30H	10.9-11.5	9.9-11.2	≥17	28-31	100
	N-33H	11.3-11.9	10.3-11.6	≥17	31-34	100
	N-35H	12.1-12.3	10.7-12.0	≥17	33-36	100
	N-40H	12.5-13.1	11.5-12.8	≥17	38-41	100
	N-42H	12.9-13.5	11.9-13.2	≥17	40-43	100
	N-27SH	10.5-11.1	9.5-10.8	≥20	25-28	150

N-30SH	10.9-11.5	9.9-11.2	≥20	28-31	150
N-33SH	11.3-11.9	10.3-11.6	≥20	31-34	150
N-35SH	11.7-12.3	10.7-12.0	≥20	33-36	150
N-38SH	12.1-12.7	11.1-12.4	≥20	36-39	150
N-40SH	12.5-13.1	11.5-12.8	≥20	38-41	150
N-25UH	10.1-10.7	9.1-10.4	≥24	23-26	180
N-27UH	10.5-11.1	9.5-10.8	≥24	25-28	180
N-30UH	10.9-11.5	9.9-11.2	≥24	28-31	180
N-33UH	11.3-11.9	10.3-11.6	≥24	31-34	180
N-35UH	11.7-12.3	10.7-12.0	≥24	33-36	180

Production Process:

Raw materials-->Burden-->Melting under vacuum-->Crushing-->Milling-->

Pressing in Magnetic Field-->Sintering & Tempering-->Machining

(Cutting,Drilling&etc.)-->Coating-->Inspection-->Packing

Types of Plating:

NdFeB usually need plating due to it is easy to rust, we treat NdFeB with Zinc coating (blue passivated or yellow passivated), Nickel coating, Nickel+Nickel coating, Nickel+Tin coating, Nickel+Copper+Nickel coating, Nickel+Epoxy coating & Epoxy coating. With these special treatment, NdFeB permanent magnets is not suitable to be installed into system without further treatment. To protect uncoated magnets temporarily, eg., damp transport or storage, passivation can be made against temporary environmental influences, such as a rise in humidity.

Dimension Range:

At present,the dimension ranges for NdFeB sintered that we can meet as follow:

The largest size:

disk: dia125x50mm

ring: dia125x115x50mm

block:150x100x50mm

The smallest size:

disk: dia1.2x0.5mm

ring:dia3.8x1.2x0.5mm

block:1.5x1.5x0.5mm

Notes:

We are researching and developing more high grade NdFeB sintered continually,please feel free to contact us for any question.

Magnets can be machined as per customers' requirements, you only need offer us your drawings or your application, we can design according to your requirements

2. Bonded NdFeB is produced by composition of rare-earth NdFeB magnetic powders embedded in thermoplastic and formed by injection moulding machining. It is hard, Non-brittle light weight, plastic-like magnet, able to be moulded to varieties of shapes e.g. thin ring, gears,arc-segments etc.

Magnetic Characteristics and Physical Properties of Bonded Nd-Fe-B

Parameters/Specifications	JN-6	JN-7	JN-8	JN-9	JN-10	JN-11	JN-12
Residual Magnetic Induction (Br) (mT)	500~590 5.0~5.9	590~630 5.9~6.3	630~650 6.3~6.5	650~700 6.5~7.0	700~740 7.0~7.4	740~810 7.4~8.1	810~860 8.1~8.6
Coercive force (Hcb)(kA/m)	320~400 4.0~5.0	400~424 5.0~5.3	424~440 5.3~5.5	440~464 5.5~5.8	440~464 5.5~5.8	424~480 5.3~6.0	424~480 5.3~6.0

Intrinsic coercive force (Hci) (kA/m)	560~720 7.0~9.0	720~880 9.0~11.0	720~880 9.0~11.0	640~840 8.0~10.5	760~840 9.5~10.5	720~920 9.0~11.5	720~920 9.0~11.5
Maximum energy product(BH) max (kJ/m ³)	44~56 5.5~7.0	56~64 7.0~8.0	64~72 8.0~9.0	72~80 9.0~10.0	80~88 10.0~11.0	88~96 11.0~12.0	96~104 12.0~13.0
Average reversible temperature coefficient (αBr) (%/°C)	-0.10~-0.09	-0.10~-0.09	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
Recoil permeability (μr)(μH/m)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Maximum operating temperature (Tw) (°C)	150	150	150	150	130	130	140
Density ρ (g/cm ³)	5.3~5.8	5.3~6.0	5.7~6.0	5.8-6.1	5.9~6.2	6.0~6.3	6.0~6.3
Production Process:Mixing raw materials->Injection mould->Finishing surface treatment->Final inspection->Final products_____							

All Copyright©Reserved by Macmill Magnets Ltd
 本站空间提供www.yaolan.net

Anexo C

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H

Anexo C-1

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H Distancia axial 0.5D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	2143.6	2136.8	1786.7	0.32	16.65
3	2152	2147.1	1801.8	0.23	16.27
6	2173.1	2168.4	1826.9	0.22	15.93
9	2206.7	2201.7	1862.2	0.23	15.61
12	2253.2	2247.1	1907.8	0.27	15.33
15	2312.6	2304.9	1971	0.33	14.77
18	2385.4	2375.5	2058	0.42	13.73
21	2472	2459.2	2155.9	0.52	12.79
24	2573	2566	2264.8	0.27	11.98
27	2689.2	2687.4	2384.1	0.07	11.35
30	2821.1	2824.4	2530.2	0.12	10.31
33	2968.8	2976.8	2692.4	0.27	9.31
36	3131.4	3142.9	2862.2	0.37	8.60
39	3306.6	3319.8	3036.4	0.40	8.17
42	3491.9	3503.7	3213	0.34	7.99
45	3681.2	3694.2	3403.6	0.35	7.54
48	3861	3871.5	3578.5	0.27	7.32
51	4019.8	4025.4	3729.8	0.14	7.21
54	4146.8	4146.7	3851.1	0.00	7.13
57	4233.3	4228.4	3945	0.12	6.81
60	4276.4	4267.6	4011.3	0.21	6.20
63	4280.6	4268.5	4046.6	0.28	5.47
66	4257.9	4249.3	4060.3	0.20	4.64
69	4225.4	4221.6	4066.5	0.09	3.76
72	4200.9	4198.8	4095.9	0.05	2.50
75	4196.2	4189.8	4122.5	0.15	1.76
78	4213.8	4200.7	4154.1	0.31	1.42
81	4256.5	4228.2	4175.6	0.66	1.90
84	4224.4	4202.8	4117.3	0.51	2.54
87	4561.7	4550.2	4232.6	0.25	7.21
90	4603.8	4592.7	4211.6	0.24	8.52
93	4561.7	4550.2	4232.6	0.25	7.21
96	4224.4	4202.8	4117.3	0.51	2.54
99	4256.5	4228.2	4175.6	0.66	1.90
102	4213.8	4200.6	4154.1	0.31	1.42
105	4196.2	4189.7	4122.5	0.15	1.76
108	4200.8	4198.8	4095.8	0.05	2.50
111	4225.4	4221.5	4066.5	0.09	3.76
114	4257.8	4249.3	4060.3	0.20	4.64
117	4280.6	4268.4	4046.5	0.29	5.47
120	4276.4	4267.5	4011.2	0.21	6.20

123	4233.2	4228.3	3944.9	0.12	6.81
126	4146.7	4146.6	3851	0.00	7.13
129	4019.7	4025.3	3729.7	0.14	7.21
132	3860.8	3871.4	3578.3	0.27	7.32
135	3681.1	3694.1	3403.5	0.35	7.54
138	3491.8	3503.5	3212.8	0.34	7.99
141	3306.5	3319.7	3036.2	0.40	8.17
144	3131.3	3142.8	2862.1	0.37	8.60
147	2968.6	2976.7	2692.2	0.27	9.31
150	2820.9	2824.3	2530.1	0.12	10.31
153	2689.1	2687.3	2383.9	0.07	11.35
156	2572.9	2565.9	2264.6	0.27	11.98
159	2471.9	2459.1	2155.8	0.52	12.79
162	2385.3	2375.4	2057.8	0.42	13.73
165	2312.5	2304.8	1970.9	0.33	14.77
168	2253	2247	1907.6	0.27	15.33
171	2206.6	2201.6	1862.1	0.23	15.61
174	2172.9	2168.3	1826.7	0.21	15.93
177	2151.9	2146.9	1801.6	0.23	16.28
180	2143.4	2136.6	1786.5	0.32	16.65
183	2151.9	2146.9	1801.6	0.23	16.28
186	2172.9	2168.3	1826.7	0.21	15.93
189	2206.5	2201.6	1862	0.22	15.61
192	2253	2247	1907.5	0.27	15.34
195	2312.4	2304.8	1970.8	0.33	14.77
198	2385.2	2375.3	2057.8	0.42	13.73
201	2471.8	2459.1	2155.7	0.51	12.79
204	2572.8	2565.9	2264.5	0.27	11.98
207	2689	2687.2	2383.9	0.07	11.35
210	2820.9	2824.3	2530	0.12	10.31
213	2968.6	2976.7	2692.1	0.27	9.31
216	3131.2	3142.8	2862	0.37	8.60
219	3306.4	3319.6	3036.2	0.40	8.17
222	3491.7	3503.4	3212.7	0.34	7.99
225	3681	3694	3403.4	0.35	7.54
228	3860.7	3871.3	3578.2	0.27	7.32
231	4019.6	4025.2	3729.6	0.14	7.21
234	4146.5	4146.5	3850.8	0.00	7.13
237	4233.1	4228.2	3944.7	0.12	6.81
240	4276.2	4267.4	4011	0.21	6.20
243	4280.4	4268.3	4046.4	0.28	5.47
246	4257.7	4249.2	4060.1	0.20	4.64
249	4225.2	4221.4	4066.3	0.09	3.76

252	4200.7	4198.7	4095.7	0.05	2.50
255	4196.1	4189.6	4122.4	0.15	1.76
258	4213.7	4200.5	4154	0.31	1.42
261	4256.4	4228.2	4175.5	0.66	1.90
264	4224.3	4202.7	4117.1	0.51	2.54
267	4561.6	4550.1	4232.5	0.25	7.21
270	4603.6	4592.5	4211.4	0.24	8.52
273	4561.6	4550.1	4232.4	0.25	7.22
276	4224.2	4202.7	4117.1	0.51	2.54
279	4256.4	4228.2	4175.5	0.66	1.90
282	4213.7	4200.5	4154	0.31	1.42
285	4196.1	4189.6	4122.3	0.15	1.76
288	4200.7	4198.6	4095.7	0.05	2.50
291	4225.2	4221.4	4066.3	0.09	3.76
294	4257.6	4249.1	4060	0.20	4.64
297	4280.3	4268.2	4046.3	0.28	5.47
300	4276.1	4267.3	4010.9	0.21	6.20
303	4233	4228.1	3944.6	0.12	6.81
306	4146.4	4146.4	3850.8	0.00	7.13
309	4019.5	4025.2	3729.5	0.14	7.21
312	3860.7	3871.2	3578.1	0.27	7.32
315	3680.9	3694	3403.3	0.36	7.54
318	3491.6	3503.3	3212.6	0.34	7.99
321	3306.3	3319.6	3036.1	0.40	8.17
324	3131.1	3142.7	2861.9	0.37	8.60
327	2968.5	2976.6	2692.1	0.27	9.31
330	2820.8	2824.2	2529.9	0.12	10.31
333	2688.9	2687.2	2383.8	0.06	11.35
336	2572.7	2565.8	2264.4	0.27	11.98
339	2471.7	2458.9	2155.6	0.52	12.79
342	2385.1	2375.2	2057.7	0.42	13.73
345	2312.3	2304.7	1970.7	0.33	14.77
348	2252.8	2246.9	1907.4	0.26	15.33
351	2206.4	2201.4	1861.9	0.23	15.61
354	2172.7	2168.1	1826.5	0.21	15.93
357	2151.7	2146.8	1801.4	0.23	16.28
360	2143.2	2136.4	1786.3	0.32	16.65

Anexo C-2

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H

Distancia axial 1.0D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	1280.6	1271.3	1268.1	0.73	0.98
3	1282.8	1273.9	1271.1	0.69	0.91
6	1289.4	1281.2	1279.4	0.64	0.78
9	1300.6	1293.7	1293.1	0.53	0.58
12	1316.9	1311.6	1312.3	0.40	0.35
15	1338.5	1335.2	1337.7	0.25	0.06
18	1365.9	1364.7	1370.4	0.09	0.33
21	1399.3	1400.3	1409.3	0.07	0.71
24	1438.8	1442.9	1454.2	0.28	1.07
27	1484.1	1491	1504.8	0.46	1.39
30	1534.5	1543.9	1561.7	0.61	1.77
33	1589.1	1600.4	1623	0.71	2.13
36	1646.6	1659.3	1686.7	0.77	2.44
39	1705.6	1719.5	1751.6	0.81	2.70
42	1765	1779.8	1816.6	0.84	2.92
45	1823.8	1839.3	1880.4	0.85	3.10
48	1881.2	1896.9	1941.1	0.83	3.18
51	1936.6	1952	1997.7	0.80	3.16
54	1989.3	2003.5	2048.9	0.71	3.00
57	2038.1	2050.3	2092.9	0.60	2.69
60	2081.6	2091	2127.5	0.45	2.21
63	2118.5	2124	2152.9	0.26	1.62
66	2148.1	2148.4	2169.2	0.01	0.98
69	2171	2166	2177.2	0.23	0.29
72	2189	2179	2179	0.46	0.46
75	2204.7	2189.9	2177.7	0.67	1.22
78	2222.9	2206.4	2188.1	0.74	1.57
81	2256.5	2213.9	2187.9	1.89	3.04
84	2031.2	2014.1	2094	0.84	3.09
87	2350.5	2328.3	2260.4	0.94	3.83
90	2341	2313.2	2242.9	1.19	4.19
93	2350.5	2328.3	2260.4	0.94	3.83
96	2031.2	2014.1	2094	0.84	3.09
99	2256.5	2213.9	2187.9	1.89	3.04
102	2222.9	2206.4	2188.1	0.74	1.57
105	2204.7	2189.9	2177.7	0.67	1.22
108	2189	2179	2179	0.46	0.46
111	2171	2166	2177.2	0.23	0.29
114	2148.1	2148.4	2169.2	0.01	0.98
117	2118.5	2124	2152.9	0.26	1.62
120	2081.6	2091	2127.5	0.45	2.21

123	2038.1	2050.3	2092.9	0.60	2.69
126	1989.3	2003.5	2048.9	0.71	3.00
129	1936.6	1952	1997.6	0.80	3.15
132	1881.2	1896.9	1941.1	0.83	3.18
135	1823.8	1839.2	1880.4	0.84	3.10
138	1765	1779.8	1816.6	0.84	2.92
141	1705.6	1719.5	1751.6	0.81	2.70
144	1646.6	1659.3	1686.6	0.77	2.43
147	1589.1	1600.4	1623	0.71	2.13
150	1534.5	1543.8	1561.7	0.61	1.77
153	1484.1	1491	1504.7	0.46	1.39
156	1438.8	1442.9	1454.2	0.28	1.07
159	1399.3	1400.3	1409.3	0.07	0.71
162	1365.9	1364.7	1370.4	0.09	0.33
165	1338.5	1335.2	1337.7	0.25	0.06
168	1316.9	1311.6	1312.3	0.40	0.35
171	1300.6	1293.7	1293	0.53	0.58
174	1289.4	1281.2	1279.4	0.64	0.78
177	1282.8	1273.9	1271.1	0.69	0.91
180	1280.6	1271.3	1268.1	0.73	0.98
183	1282.8	1273.9	1271.1	0.69	0.91
186	1289.4	1281.2	1279.4	0.64	0.78
189	1300.6	1293.7	1293	0.53	0.58
192	1316.8	1311.6	1312.3	0.39	0.34
195	1338.5	1335.2	1337.7	0.25	0.06
198	1365.9	1364.7	1370.4	0.09	0.33
201	1399.3	1400.3	1409.3	0.07	0.71
204	1438.8	1442.9	1454.2	0.28	1.07
207	1484.1	1491	1504.7	0.46	1.39
210	1534.5	1543.8	1561.7	0.61	1.77
213	1589.1	1600.4	1622.9	0.71	2.13
216	1646.6	1659.3	1686.6	0.77	2.43
219	1705.6	1719.5	1751.6	0.81	2.70
222	1765	1779.8	1816.6	0.84	2.92
225	1823.8	1839.2	1880.4	0.84	3.10
228	1881.2	1896.9	1941.1	0.83	3.18
231	1936.6	1952	1997.6	0.80	3.15
234	1989.3	2003.5	2048.8	0.71	2.99
237	2038.1	2050.3	2092.9	0.60	2.69
240	2081.6	2091	2127.5	0.45	2.21
243	2118.4	2124	2152.9	0.26	1.63
246	2148.1	2148.4	2169.2	0.01	0.98
249	2171	2166	2177.2	0.23	0.29

252	2188.9	2179	2179	0.45	0.45
255	2204.7	2189.9	2177.7	0.67	1.22
258	2222.8	2206.4	2188.1	0.74	1.56
261	2256.5	2213.9	2187.9	1.89	3.04
264	2031.2	2014.1	2093.9	0.84	3.09
267	2350.5	2328.3	2260.4	0.94	3.83
270	2341	2313.2	2242.9	1.19	4.19
273	2350.5	2328.3	2260.4	0.94	3.83
276	2031.1	2014	2093.9	0.84	3.09
279	2256.5	2213.9	2187.9	1.89	3.04
282	2222.8	2206.4	2188.1	0.74	1.56
285	2204.7	2189.9	2177.7	0.67	1.22
288	2188.9	2179	2179	0.45	0.45
291	2171	2166	2177.2	0.23	0.29
294	2148.1	2148.4	2169.2	0.01	0.98
297	2118.4	2124	2152.9	0.26	1.63
300	2081.6	2091	2127.5	0.45	2.21
303	2038.1	2050.3	2092.9	0.60	2.69
306	1989.3	2003.5	2048.8	0.71	2.99
309	1936.6	1952	1997.6	0.80	3.15
312	1881.2	1896.9	1941.1	0.83	3.18
315	1823.8	1839.2	1880.4	0.84	3.10
318	1765	1779.8	1816.6	0.84	2.92
321	1705.6	1719.5	1751.6	0.81	2.70
324	1646.6	1659.3	1686.6	0.77	2.43
327	1589.1	1600.4	1623	0.71	2.13
330	1534.5	1543.8	1561.7	0.61	1.77
333	1484.1	1491	1504.7	0.46	1.39
336	1438.8	1442.9	1454.2	0.28	1.07
339	1399.3	1400.3	1409.3	0.07	0.71
342	1365.9	1364.7	1370.4	0.09	0.33
345	1338.5	1335.2	1337.7	0.25	0.06
348	1316.9	1311.6	1312.3	0.40	0.35
351	1300.6	1293.7	1293	0.53	0.58
354	1289.4	1281.2	1279.4	0.64	0.78
357	1282.8	1273.9	1271.1	0.69	0.91
360	1280.6	1271.3	1268.1	0.73	0.98

Anexo C-3

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H

Distancia axial 1.5D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	235.65	235.44	243.31	0.09	3.25
3	238.33	238.41	246.63	0.03	3.48
6	246.13	246.85	255.81	0.29	3.93
9	258.68	260.3	270.3	0.63	4.49
12	275.45	278.1	289.4	0.96	5.06
15	295.81	299.53	312.45	1.26	5.63
18	319.11	323.87	338.56	1.49	6.10
21	344.71	350.43	366.71	1.66	6.38
24	371.96	378.5	396.2	1.76	6.52
27	400.24	407.33	426.39	1.77	6.53
30	428.94	436.28	456.29	1.71	6.38
33	457.43	464.73	485.11	1.60	6.05
36	485.08	492.06	512.31	1.44	5.61
39	511.26	517.65	537.32	1.25	5.10
42	535.27	540.85	559.51	1.04	4.53
45	556.44	560.7	577.45	0.77	3.78
48	574.4	577.16	591.73	0.48	3.02
51	588.78	590	602.24	0.21	2.29
54	599.36	599.09	608.99	0.05	1.61
57	606.1	604.46	611.65	0.27	0.92
60	609.12	606.32	610.68	0.46	0.26
63	608.69	604.88	607.11	0.63	0.26
66	605.33	600.6	601.52	0.78	0.63
69	599.68	594.54	594.57	0.86	0.85
72	592.78	587.93	587.35	0.82	0.92
75	586.01	581.65	580.81	0.74	0.89
78	582.48	582.83	585.67	0.06	0.55
81	600.09	593.34	592.13	1.12	1.33
84	521.37	523.8	558.03	0.47	7.03
87	559.02	559.15	556.3	0.02	0.49
90	552.9	553.18	556.83	0.05	0.71
93	559.02	559.16	556.3	0.03	0.49
96	521.38	523.81	558.03	0.47	7.03
99	600.1	593.35	592.14	1.12	1.33
102	582.48	582.83	585.66	0.06	0.55
105	586.01	581.65	580.81	0.74	0.89
108	592.78	587.93	587.35	0.82	0.92
111	599.68	594.54	594.57	0.86	0.85
114	605.33	600.6	601.52	0.78	0.63
117	608.69	604.88	607.11	0.63	0.26
120	609.11	606.31	610.68	0.46	0.26

123	606.1	604.46	611.65	0.27	0.92
126	599.36	599.08	608.99	0.05	1.61
129	588.77	589.99	602.24	0.21	2.29
132	574.4	577.16	591.72	0.48	3.02
135	556.44	560.69	577.45	0.76	3.78
138	535.27	540.84	559.5	1.04	4.53
141	511.25	517.65	537.31	1.25	5.10
144	485.08	492.05	512.3	1.44	5.61
147	457.43	464.73	485.11	1.60	6.05
150	428.94	436.27	456.29	1.71	6.38
153	400.24	407.32	426.39	1.77	6.53
156	371.95	378.49	396.2	1.76	6.52
159	344.7	350.43	366.71	1.66	6.39
162	319.11	323.87	338.56	1.49	6.10
165	295.81	299.53	312.44	1.26	5.62
168	275.45	278.1	289.4	0.96	5.06
171	258.68	260.3	270.3	0.63	4.49
174	246.13	246.85	255.81	0.29	3.93
177	238.33	238.41	246.63	0.03	3.48
180	235.65	235.45	243.31	0.08	3.25
183	238.33	238.41	246.63	0.03	3.48
186	246.13	246.85	255.81	0.29	3.93
189	258.68	260.3	270.3	0.63	4.49
192	275.45	278.1	289.4	0.96	5.06
195	295.81	299.53	312.45	1.26	5.63
198	319.11	323.87	338.56	1.49	6.10
201	344.7	350.43	366.71	1.66	6.39
204	371.95	378.49	396.2	1.76	6.52
207	400.24	407.32	426.39	1.77	6.53
210	428.94	436.27	456.29	1.71	6.38
213	457.43	464.73	485.11	1.60	6.05
216	485.08	492.05	512.3	1.44	5.61
219	511.25	517.65	537.31	1.25	5.10
222	535.26	540.84	559.5	1.04	4.53
225	556.44	560.69	577.44	0.76	3.77
228	574.39	577.16	591.72	0.48	3.02
231	588.77	589.99	602.24	0.21	2.29
234	599.36	599.08	608.98	0.05	1.61
237	606.1	604.46	611.65	0.27	0.92
240	609.11	606.31	610.67	0.46	0.26
243	608.69	604.88	607.11	0.63	0.26
246	605.32	600.6	601.52	0.78	0.63
249	599.68	594.54	594.57	0.86	0.85

252	592.78	587.93	587.35	0.82	0.92
255	586.01	581.65	580.81	0.74	0.89
258	582.48	582.83	585.66	0.06	0.55
261	600.1	593.35	592.13	1.12	1.33
264	521.36	523.79	558.01	0.47	7.03
267	559.02	559.16	556.31	0.03	0.48
270	552.9	553.18	556.82	0.05	0.71
273	559.02	559.16	556.3	0.03	0.49
276	521.34	523.77	558	0.47	7.03
279	600.09	593.34	592.13	1.12	1.33
282	582.48	582.83	585.67	0.06	0.55
285	586	581.65	580.81	0.74	0.89
288	592.77	587.93	587.35	0.82	0.91
291	599.68	594.54	594.57	0.86	0.85
294	605.32	600.6	601.52	0.78	0.63
297	608.69	604.88	607.11	0.63	0.26
300	609.11	606.31	610.67	0.46	0.26
303	606.1	604.46	611.65	0.27	0.92
306	599.36	599.08	608.98	0.05	1.61
309	588.77	589.99	602.24	0.21	2.29
312	574.4	577.16	591.72	0.48	3.02
315	556.44	560.69	577.45	0.76	3.78
318	535.27	540.84	559.5	1.04	4.53
321	511.25	517.65	537.31	1.25	5.10
324	485.08	492.06	512.31	1.44	5.61
327	457.43	464.73	485.11	1.60	6.05
330	428.94	436.28	456.29	1.71	6.38
333	400.24	407.33	426.39	1.77	6.53
336	371.96	378.5	396.21	1.76	6.52
339	344.71	350.43	366.71	1.66	6.38
342	319.12	323.88	338.56	1.49	6.09
345	295.82	299.54	312.45	1.26	5.62
348	275.46	278.11	289.4	0.96	5.06
351	258.69	260.31	270.31	0.63	4.49
354	246.13	246.86	255.81	0.30	3.93
357	238.33	238.42	246.64	0.04	3.49
360	235.65	235.45	243.32	0.08	3.25

Anexo C-4

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H Distancia axial 2.0D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	158.13	156.44	151.03	1.07	4.49
3	159.78	158.24	153.09	0.96	4.19
6	164.6	163.48	159.03	0.68	3.38
9	172.25	171.72	168.28	0.31	2.30
12	182.24	182.38	180.12	0.08	1.16
15	194.04	194.84	193.76	0.41	0.14
18	207.13	208.5	208.52	0.66	0.67
21	221.06	222.85	223.84	0.81	1.26
24	235.41	237.49	239.23	0.88	1.62
27	249.84	252.05	254.33	0.88	1.80
30	264.04	266.22	268.85	0.83	1.82
33	277.76	279.76	282.54	0.72	1.72
36	290.76	292.47	295.22	0.59	1.53
39	302.85	304.18	306.75	0.44	1.29
42	313.87	314.76	317.03	0.28	1.01
45	323.66	324.08	325.94	0.13	0.70
48	332.12	332.05	333.43	0.02	0.39
51	339.17	338.63	339.51	0.16	0.10
54	344.77	343.81	344.19	0.28	0.17
57	348.94	347.62	347.46	0.38	0.42
60	351.72	350.13	349.37	0.45	0.67
63	353.26	351.45	350.16	0.51	0.88
66	353.73	351.74	350.06	0.56	1.04
69	353.42	351.34	349.32	0.59	1.16
72	352.75	350.82	348.44	0.55	1.22
75	352.32	350.51	347.76	0.51	1.29
78	353.56	354.11	352.84	0.16	0.20
81	366.06	364.68	360.1	0.38	1.63
84	350.21	349.44	351.61	0.22	0.40
87	337.65	334.06	324.82	1.06	3.80
90	339.2	335.53	328.33	1.08	3.20
93	337.65	334.06	324.82	1.06	3.80
96	350.21	349.44	351.61	0.22	0.40
99	366.07	364.68	360.11	0.38	1.63
102	353.56	354.11	352.84	0.16	0.20
105	352.32	350.51	347.76	0.51	1.29
108	352.75	350.82	348.44	0.55	1.22
111	353.42	351.34	349.32	0.59	1.16
114	353.73	351.74	350.06	0.56	1.04
117	353.26	351.45	350.16	0.51	0.88
120	351.72	350.13	349.37	0.45	0.67

123	348.93	347.62	347.46	0.38	0.42
126	344.77	343.81	344.19	0.28	0.17
129	339.16	338.63	339.51	0.16	0.10
132	332.12	332.05	333.43	0.02	0.39
135	323.66	324.07	325.93	0.13	0.70
138	313.87	314.76	317.03	0.28	1.01
141	302.85	304.18	306.75	0.44	1.29
144	290.76	292.47	295.21	0.59	1.53
147	277.76	279.76	282.53	0.72	1.72
150	264.04	266.22	268.84	0.83	1.82
153	249.84	252.04	254.33	0.88	1.80
156	235.41	237.49	239.23	0.88	1.62
159	221.06	222.85	223.83	0.81	1.25
162	207.13	208.49	208.52	0.66	0.67
165	194.03	194.83	193.75	0.41	0.14
168	182.23	182.38	180.11	0.08	1.16
171	172.24	171.72	168.28	0.30	2.30
174	164.6	163.48	159.02	0.68	3.39
177	159.78	158.24	153.09	0.96	4.19
180	158.13	156.44	151.03	1.07	4.49
183	159.78	158.24	153.09	0.96	4.19
186	164.6	163.48	159.02	0.68	3.39
189	172.24	171.72	168.28	0.30	2.30
192	182.23	182.38	180.11	0.08	1.16
195	194.03	194.83	193.75	0.41	0.14
198	207.13	208.49	208.52	0.66	0.67
201	221.06	222.85	223.83	0.81	1.25
204	235.41	237.49	239.23	0.88	1.62
207	249.84	252.04	254.33	0.88	1.80
210	264.04	266.21	268.84	0.82	1.82
213	277.75	279.76	282.53	0.72	1.72
216	290.76	292.47	295.21	0.59	1.53
219	302.85	304.18	306.74	0.44	1.28
222	313.87	314.76	317.03	0.28	1.01
225	323.66	324.07	325.93	0.13	0.70
228	332.11	332.04	333.43	0.02	0.40
231	339.16	338.63	339.5	0.16	0.10
234	344.77	343.81	344.19	0.28	0.17
237	348.93	347.62	347.46	0.38	0.42
240	351.72	350.13	349.36	0.45	0.67
243	353.25	351.45	350.16	0.51	0.87
246	353.73	351.73	350.06	0.57	1.04
249	353.41	351.34	349.32	0.59	1.16

252	352.75	350.82	348.43	0.55	1.22
255	352.32	350.51	347.76	0.51	1.29
258	353.56	354.1	352.83	0.15	0.21
261	366.06	364.68	360.1	0.38	1.63
264	350.2	349.43	351.59	0.22	0.40
267	337.65	334.06	324.82	1.06	3.80
270	339.19	335.52	328.33	1.08	3.20
273	337.65	334.06	324.82	1.06	3.80
276	350.2	349.43	351.59	0.22	0.40
279	366.06	364.68	360.1	0.38	1.63
282	353.56	354.11	352.83	0.16	0.21
285	352.32	350.51	347.76	0.51	1.29
288	352.75	350.81	348.43	0.55	1.22
291	353.41	351.34	349.32	0.59	1.16
294	353.72	351.73	350.06	0.56	1.03
297	353.25	351.45	350.16	0.51	0.87
300	351.72	350.13	349.36	0.45	0.67
303	348.93	347.62	347.46	0.38	0.42
306	344.77	343.81	344.19	0.28	0.17
309	339.16	338.63	339.5	0.16	0.10
312	332.11	332.04	333.43	0.02	0.40
315	323.66	324.07	325.93	0.13	0.70
318	313.87	314.76	317.03	0.28	1.01
321	302.85	304.18	306.74	0.44	1.28
324	290.76	292.47	295.21	0.59	1.53
327	277.75	279.76	282.53	0.72	1.72
330	264.04	266.21	268.84	0.82	1.82
333	249.84	252.04	254.33	0.88	1.80
336	235.41	237.49	239.23	0.88	1.62
339	221.06	222.85	223.83	0.81	1.25
342	207.13	208.49	208.52	0.66	0.67
345	194.03	194.83	193.75	0.41	0.14
348	182.23	182.38	180.11	0.08	1.16
351	172.24	171.72	168.28	0.30	2.30
354	164.6	163.48	159.02	0.68	3.39
357	159.78	158.24	153.09	0.96	4.19
360	158.13	156.44	151.03	1.07	4.49

Anexo C-5

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H Distancia axial 2.5D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	254.15	254.11	254.4	0.02	0.10
3	254.51	254.5	254.83	0.00	0.13
6	255.59	255.62	256.05	0.01	0.18
9	257.4	257.49	258.05	0.03	0.25
12	259.94	260.08	260.78	0.05	0.32
15	263.12	263.31	264.21	0.07	0.41
18	266.81	267.06	268.21	0.09	0.52
21	270.88	271.18	272.55	0.11	0.62
24	275.16	275.54	277.09	0.14	0.70
27	279.54	279.97	281.67	0.15	0.76
30	283.9	284.35	286.18	0.16	0.80
33	288.13	288.57	290.49	0.15	0.82
36	292.14	292.55	294.5	0.14	0.81
39	295.88	296.23	298.16	0.12	0.77
42	299.26	299.53	301.4	0.09	0.72
45	302.22	302.38	304.14	0.05	0.64
48	304.74	304.77	306.39	0.01	0.54
51	306.78	306.67	308.14	0.04	0.44
54	308.34	308.08	309.39	0.08	0.34
57	309.42	309.03	310.14	0.13	0.23
60	310.08	309.54	310.44	0.17	0.12
63	310.35	309.67	310.37	0.22	0.01
66	310.31	309.48	310.03	0.27	0.09
69	310.04	309.1	309.47	0.30	0.18
72	309.68	308.68	308.9	0.32	0.25
75	309.38	308.3	308.39	0.35	0.32
78	309.5	308.92	309.45	0.19	0.02
81	312.61	311.44	311.31	0.37	0.42
84	307.39	306.99	308.94	0.13	0.50
87	308.48	307.12	305.77	0.44	0.88
90	308.6	307.21	306.4	0.45	0.71
93	308.48	307.12	305.77	0.44	0.88
96	307.39	306.99	308.94	0.13	0.50
99	312.61	311.44	311.31	0.37	0.42
102	309.5	308.92	309.45	0.19	0.02
105	309.38	308.3	308.39	0.35	0.32
108	309.68	308.68	308.9	0.32	0.25
111	310.04	309.1	309.47	0.30	0.18
114	310.3	309.48	310.03	0.26	0.09
117	310.34	309.67	310.37	0.22	0.01
120	310.08	309.54	310.44	0.17	0.12

123	309.42	309.03	310.14	0.13	0.23
126	308.34	308.08	309.39	0.08	0.34
129	306.78	306.67	308.14	0.04	0.44
132	304.74	304.77	306.39	0.01	0.54
135	302.22	302.38	304.14	0.05	0.64
138	299.25	299.53	301.4	0.09	0.72
141	295.87	296.23	298.16	0.12	0.77
144	292.14	292.55	294.5	0.14	0.81
147	288.12	288.57	290.49	0.16	0.82
150	283.9	284.34	286.18	0.15	0.80
153	279.54	279.97	281.67	0.15	0.76
156	275.16	275.54	277.09	0.14	0.70
159	270.87	271.18	272.55	0.11	0.62
162	266.81	267.06	268.21	0.09	0.52
165	263.12	263.31	264.21	0.07	0.41
168	259.94	260.08	260.78	0.05	0.32
171	257.4	257.49	258.05	0.03	0.25
174	255.59	255.62	256.05	0.01	0.18
177	254.51	254.5	254.83	0.00	0.13
180	254.15	254.11	254.4	0.02	0.10
183	254.51	254.5	254.83	0.00	0.13
186	255.59	255.62	256.05	0.01	0.18
189	257.4	257.49	258.05	0.03	0.25
192	259.94	260.08	260.78	0.05	0.32
195	263.12	263.31	264.21	0.07	0.41
198	266.81	267.06	268.21	0.09	0.52
201	270.87	271.18	272.55	0.11	0.62
204	275.16	275.54	277.09	0.14	0.70
207	279.54	279.97	281.67	0.15	0.76
210	283.9	284.34	286.18	0.15	0.80
213	288.12	288.57	290.49	0.16	0.82
216	292.14	292.55	294.5	0.14	0.81
219	295.87	296.23	298.16	0.12	0.77
222	299.25	299.53	301.4	0.09	0.72
225	302.22	302.38	304.14	0.05	0.64
228	304.74	304.77	306.39	0.01	0.54
231	306.78	306.67	308.14	0.04	0.44
234	308.33	308.08	309.39	0.08	0.34
237	309.42	309.03	310.14	0.13	0.23
240	310.07	309.54	310.43	0.17	0.12
243	310.34	309.67	310.37	0.22	0.01
246	310.3	309.48	310.03	0.26	0.09
249	310.04	309.1	309.47	0.30	0.18

252	309.68	308.68	308.9	0.32	0.25
255	309.38	308.3	308.39	0.35	0.32
258	309.5	308.92	309.45	0.19	0.02
261	312.61	311.44	311.31	0.37	0.42
264	307.38	306.99	308.94	0.13	0.51
267	308.48	307.12	305.77	0.44	0.88
270	308.6	307.21	306.4	0.45	0.71
273	308.48	307.12	305.77	0.44	0.88
276	307.38	306.99	308.94	0.13	0.51
279	312.61	311.44	311.31	0.37	0.42
282	309.5	308.92	309.45	0.19	0.02
285	309.38	308.3	308.39	0.35	0.32
288	309.68	308.68	308.9	0.32	0.25
291	310.04	309.1	309.47	0.30	0.18
294	310.3	309.48	310.03	0.26	0.09
297	310.34	309.67	310.37	0.22	0.01
300	310.07	309.54	310.43	0.17	0.12
303	309.42	309.03	310.14	0.13	0.23
306	308.33	308.08	309.39	0.08	0.34
309	306.78	306.67	308.14	0.04	0.44
312	304.74	304.77	306.39	0.01	0.54
315	302.22	302.38	304.14	0.05	0.64
318	299.25	299.53	301.4	0.09	0.72
321	295.87	296.23	298.16	0.12	0.77
324	292.14	292.55	294.5	0.14	0.81
327	288.12	288.57	290.49	0.16	0.82
330	283.9	284.34	286.18	0.15	0.80
333	279.54	279.97	281.67	0.15	0.76
336	275.16	275.54	277.09	0.14	0.70
339	270.88	271.18	272.55	0.11	0.62
342	266.81	267.06	268.21	0.09	0.52
345	263.12	263.31	264.21	0.07	0.41
348	259.94	260.08	260.78	0.05	0.32
351	257.4	257.49	258.05	0.03	0.25
354	255.59	255.62	256.05	0.01	0.18
357	254.51	254.5	254.83	0.00	0.13
360	254.15	254.11	254.4	0.02	0.10

Anexo C-6

Análisis de Sensibilidad del Campo Magnético H Distancia axial 3.0D

Grados	Mallado 1	Mallado 2	Mallado 3	% Error	% Error
	Prueba_46hrs	Prueba_30hrs	Prueba_3hrs	Mallado 1 vs Mallado 2	Mallado 1 vs Mallado 3
0	238.97	239.51	242.05	0.23	1.29
3	239.18	239.73	242.27	0.23	1.29
6	239.67	240.18	242.7	0.21	1.26
9	240.22	240.7	243.19	0.20	1.24
12	240.68	241.14	243.63	0.19	1.23
15	241.02	241.45	243.92	0.18	1.20
18	241.24	241.65	244.08	0.17	1.18
21	241.39	241.75	244.14	0.15	1.14
24	241.46	241.78	244.11	0.13	1.10
27	241.47	241.73	243.98	0.11	1.04
30	241.39	241.6	243.77	0.09	0.99
33	241.21	241.36	243.44	0.06	0.92
36	240.91	241	242.99	0.04	0.86
39	240.49	240.51	242.42	0.01	0.80
42	239.92	239.89	241.71	0.01	0.75
45	239.22	239.12	240.86	0.04	0.69
48	238.37	238.23	239.88	0.06	0.63
51	237.41	237.22	238.8	0.08	0.59
54	236.35	236.11	237.62	0.10	0.54
57	235.21	234.93	236.38	0.12	0.50
60	234.02	233.7	235.09	0.14	0.46
63	232.8	232.45	233.8	0.15	0.43
66	231.59	231.21	232.54	0.16	0.41
69	230.42	230.01	231.31	0.18	0.39
72	229.32	228.89	230.2	0.19	0.38
75	228.3	227.86	229.18	0.19	0.39
78	227.42	227	228.44	0.18	0.45
81	226.93	226.63	228.18	0.13	0.55
84	227.4	227.52	228.49	0.05	0.48
87	228.49	228.48	230.04	0.00	0.68
90	228.36	228.38	230.07	0.01	0.75
93	228.49	228.48	230.04	0.00	0.68
96	227.4	227.52	228.49	0.05	0.48
99	226.93	226.63	228.18	0.13	0.55
102	227.42	227	228.44	0.18	0.45
105	228.3	227.86	229.18	0.19	0.39
108	229.32	228.89	230.2	0.19	0.38
111	230.42	230.01	231.31	0.18	0.39
114	231.59	231.21	232.54	0.16	0.41
117	232.8	232.45	233.8	0.15	0.43
120	234.02	233.7	235.09	0.14	0.46

123	235.21	234.93	236.38	0.12	0.50
126	236.35	236.11	237.62	0.10	0.54
129	237.41	237.22	238.8	0.08	0.59
132	238.37	238.23	239.88	0.06	0.63
135	239.22	239.12	240.86	0.04	0.69
138	239.92	239.89	241.71	0.01	0.75
141	240.49	240.51	242.42	0.01	0.80
144	240.91	241	242.99	0.04	0.86
147	241.21	241.36	243.44	0.06	0.92
150	241.39	241.6	243.77	0.09	0.99
153	241.47	241.73	243.98	0.11	1.04
156	241.46	241.78	244.11	0.13	1.10
159	241.39	241.75	244.14	0.15	1.14
162	241.24	241.65	244.08	0.17	1.18
165	241.02	241.45	243.92	0.18	1.20
168	240.68	241.14	243.62	0.19	1.22
171	240.22	240.7	243.19	0.20	1.24
174	239.67	240.18	242.7	0.21	1.26
177	239.18	239.73	242.27	0.23	1.29
180	238.97	239.51	242.05	0.23	1.29
183	239.18	239.73	242.27	0.23	1.29
186	239.67	240.18	242.7	0.21	1.26
189	240.22	240.7	243.19	0.20	1.24
192	240.68	241.14	243.62	0.19	1.22
195	241.02	241.45	243.92	0.18	1.20
198	241.24	241.65	244.08	0.17	1.18
201	241.39	241.75	244.14	0.15	1.14
204	241.46	241.78	244.11	0.13	1.10
207	241.47	241.73	243.98	0.11	1.04
210	241.39	241.6	243.77	0.09	0.99
213	241.21	241.36	243.44	0.06	0.92
216	240.91	241	242.99	0.04	0.86
219	240.49	240.51	242.42	0.01	0.80
222	239.92	239.89	241.71	0.01	0.75
225	239.22	239.12	240.86	0.04	0.69
228	238.37	238.23	239.88	0.06	0.63
231	237.41	237.22	238.8	0.08	0.59
234	236.35	236.11	237.62	0.10	0.54
237	235.21	234.93	236.38	0.12	0.50
240	234.02	233.7	235.09	0.14	0.46
243	232.8	232.45	233.8	0.15	0.43
246	231.59	231.21	232.54	0.16	0.41
249	230.42	230.01	231.32	0.18	0.39

252	229.32	228.89	230.2	0.19	0.38
255	228.3	227.86	229.18	0.19	0.39
258	227.42	227	228.44	0.18	0.45
261	226.93	226.63	228.18	0.13	0.55
264	227.4	227.52	228.49	0.05	0.48
267	228.49	228.48	230.04	0.00	0.68
270	228.36	228.38	230.07	0.01	0.75
273	228.49	228.48	230.04	0.00	0.68
276	227.4	227.52	228.49	0.05	0.48
279	226.93	226.63	228.18	0.13	0.55
282	227.42	227	228.44	0.18	0.45
285	228.3	227.86	229.18	0.19	0.39
288	229.32	228.89	230.2	0.19	0.38
291	230.42	230.01	231.31	0.18	0.39
294	231.59	231.21	232.54	0.16	0.41
297	232.8	232.45	233.8	0.15	0.43
300	234.02	233.7	235.09	0.14	0.46
303	235.21	234.93	236.38	0.12	0.50
306	236.35	236.11	237.62	0.10	0.54
309	237.41	237.22	238.8	0.08	0.59
312	238.37	238.23	239.88	0.06	0.63
315	239.22	239.12	240.86	0.04	0.69
318	239.92	239.89	241.71	0.01	0.75
321	240.49	240.51	242.42	0.01	0.80
324	240.91	241	242.99	0.04	0.86
327	241.21	241.36	243.44	0.06	0.92
330	241.39	241.6	243.77	0.09	0.99
333	241.47	241.73	243.98	0.11	1.04
336	241.46	241.78	244.11	0.13	1.10
339	241.39	241.75	244.14	0.15	1.14
342	241.24	241.65	244.08	0.17	1.18
345	241.02	241.45	243.92	0.18	1.20
348	240.68	241.14	243.62	0.19	1.22
351	240.22	240.7	243.19	0.20	1.24
354	239.67	240.18	242.7	0.21	1.26
357	239.18	239.72	242.27	0.23	1.29
360	238.97	239.51	242.05	0.23	1.29

Anexo D

Códigos del Programa

CODIGOS DEL PROGRAMA

CONDICIÓN NOMINAL	
/PREP7	VATT,1,1,1
/Titulo, 3-D Análisis de tubería **CONDICION NORMAL**	VSEL,s,volu,,22
ET,1,SOLID9 !Define el tipo de elemento	VATT,1,1,1
/units,si !Selección de unidades	VSEL,s,volu,,15
MP,MURX,1,1.2 !Permeabilidad del imán en X	VATT,1,1,1
MP,MURY,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Y	VSEL,s,volu,,2,3 !Propiedades del Aire
MP,MURZ,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Z	VATT,2,1,1
MP,MGY,1,868000 !Magnetización del imán	VSEL,S,VOLU,,5,6
MP,MURX,2,1 !Permeabilidad del aire	VATT,2,1,1
MP,MURX,3,2000 !Permeabilidad del acero	VSEL,S,VOLU,,12,13
	VATT,2,1,1
	VSEL,s,volu,,9,10
! * DIMENSIONES DEL IMÁN *	VATT,2,1,1
BLC4,0,0,0.0127,0.101855	VSEL,s,volu,,21
BLC4,-0.0127,0,0.0127,0.101855	VATT,2,1,1
BLC4,-0.0127,-0.101855,0.0127,0.101855	VSEL,s,volu,,16
BLC4,0,-0.101855,0.0127,0.101855	VATT,2,1,1
	VSEL,s,volu,,18,19
! * DIMENSION RADIAL DEL TUBO *	VATT,2,1,1
CYL4,0,0,0, ,0.1026437091	VSEL,s,volu,,26,27
CYL4,0,0,0, ,0.127255	VATT,2,1,1
CYL4,0,0,0, ,0.136525	VSEL,s,volu,,23,24
ADELE,all	VATT,2,1,1
LSTR,25,27	VSEL,s,volu,,4 !Propiedades del Acero
LSTR,26,28	VATT,3,1,1
LOVLAP,all	VSEL,s,volu,,7
K, ,0.0127,0.136525,	VATT,3,1,1
K, ,-0.0127,0.136525,	VSEL,s,volu,,14
K, ,0.0127,-0.136525,	VATT,3,1,1
K, ,-0.0127,-0.136525	VSEL,S,VOLU,,11
LSTR,3,6	VATT,3,1,1
LSTR,8,7	VSEL,S,VOLU,,17
LSTR,9,12	VATT,3,1,1
LSTR,14,11	VSEL,s,volu,,20
LOVLAP,all	VATT,3,1,1
LDELE,12,0	VSEL,s,volu,,28
LDELE,13,0	VATT,3,1,1
LDELE,16,0	VSEL,s,volu,,25
LDELE,17,0	VATT,3,1,1
	ALLSEL,ALL
! * AREAS *	! * CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *
AL,1,2,3,4 \$AL,2,34,35 \$AL,49,35,19,11	DA,54,ASYM \$DA,29,ASYM \$DA,75,ASYM
AL,53,19,61,69 \$AL,3,36,38 \$AL,36,11,50,59	DA,96,ASYM \$DA,53,ASYM \$DA,43,ASYM
AL,54,59,69,63 \$AL,31,8,4,37 \$AL,40,8,42	DA,106,ASYM \$DA,112,ASYM \$DA,74,ASYM
AL,51,29,42,14 \$AL,55,29,65,70 \$AL,37,38,41	DA,67,ASYM \$DA,84,ASYM \$DA,93,ASYM
AL,41,14,50,60 \$AL,60,54,70,64 \$AL,31,32,39,9	DA,1,ASYM \$DA,8,ASYM \$DA,22,ASYM
AL,51,43,30,15 \$AL,55,30,66,71 \$AL,9,44,46	
AL,44,15,52,58 \$AL,58,56,71,67 \$AL,40,39,43	! * Divisiones del 1er mallado *
AL,1,32,33,45 \$AL,33,34,47 \$AL,47,49,18,20	LESIZE,74,,,22,,,,,0 \$LESIZE,101,,,22,,,,,0 \$LESIZE,117,,,22,,,,,0
AL,20,53,72,62 \$AL,45,46,48 \$AL,48,18,52,57	LESIZE,137,,,22,,,,,0 \$LESIZE,107,,,4,,,,,0 \$LESIZE,85,,,4,,,,,0
AL,57,56,72,68	LESIZE,73,,,3,,,,,0 \$LESIZE,24,,,20,,,,,0 \$LESIZE,76,,,4,,,,,0
! + PRIMERA EXTRUSIÓN +	! * MALLADO 1 *
FLST,2,28,5,ORDE,2	VMESH,ALL
FITEM,2,1	
FITEM,2,-28	! + SEGUNDA EXTRUSIÓN +
VEXT,P51X, , ,0,0,0.0254,,,,	FLST,2,28,5,ORDE,28
	FITEM,2,29
! * PROPIEDADES DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *	FITEM,2,34
VSEL,S,VOLU,,1 !Propiedades del Imán	FITEM,2,37
VATT,1,1,1	
VSEL,S,VOLU,,8	

FITEM,2,41	DA,118,ASYM	\$DA,121,ASYM	\$DA,125,ASYM
FITEM,2,45	DA,113,ASYM	\$DA,129,ASYM	\$DA,132,ASYM
FITEM,2,48	DA,135,ASYM	\$DA,142,ASYM	\$DA,145,ASYM
FITEM,2,51	DA,149,ASYM	\$DA,138,ASYM	\$DA,153,ASYM
FITEM,2,54	DA,155,ASYM	\$DA,157,ASYM	\$DA,179,ASYM
FITEM,2,58	DA,163,ASYM	\$DA,167,ASYM	\$DA,159,ASYM
FITEM,2,61	DA,170,ASYM	\$DA,173,ASYM	\$DA,176,ASYM
FITEM,2,65	DA,183,ASYM	\$DA,185,ASYM	\$DA,188,ASYM
FITEM,2,69	DA,180,ASYM	\$DA,191,ASYM	\$DA,193,ASYM
FITEM,2,71	DA,195,ASYM	\$DA,137,ASYM	\$DA,127,ASYM
FITEM,2,73	DA,190,ASYM	\$DA,196,ASYM	\$DA,158,ASYM
FITEM,2,75	DA,151,ASYM	\$DA,168,ASYM	\$DA,177,ASYM
FITEM,2,79			
FITEM,2,83	!	* = SEGUNDO MALLADO = *	
FITEM,2,86	FLST,5,28,6,ORDE,2		
FITEM,2,89	FITEM,5,29		
FITEM,2,92	FITEM,5,-56		
FITEM,2,95	CM,_Y,VOLU		
FITEM,2,-96	VSEL,, , ,P51X		
FITEM,2,99	CM,_Y1,VOLU		
FITEM,2,101	CHKMSH,'VOLU'		
FITEM,2,104	CMSEL,S,_Y		
FITEM,2,107	!* VMESH,_Y1		
FITEM,2,109	!* CMDELE,_Y		
FITEM,2,111	CMDELE,_Y1		
VEXT,P51X, , ,0,0,0.9,,,	CMDELE,_Y2		
!	!* * PROPIEDADES DE LA 2da. EXTRUSIÓN *		
VSEL,s,volu,,29,31	!Propiedades del Aire		
VATT,2,1,1			
VSEL,S,VOLU,,33,34			
VATT,2,1,1			
VSEL,S,VOLU,,36,38			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,40,41			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,43,44			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,49			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,46,47			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,50,52			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,54,55			
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,32	!Propiedades del Acero		
VATT,3,1,1			
VSEL,s,volu,,35			
VATT,3,1,1			
VSEL,s,volu,,42			
VATT,3,1,1			
VSEL,S,VOLU,,39			
VATT,3,1,1			
VSEL,S,VOLU,,45			
VATT,3,1,1			
VSEL,s,volu,,48			
VATT,3,1,1			
VSEL,s,volu,,56			
VATT,3,1,1			
VSEL,s,volu,,53			
VATT,3,1,1			
ALLSEL,ALL			
!	* CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 2da. EXTRUSIÓN *		
	DA,118,ASYM	\$DA,121,ASYM	\$DA,125,ASYM
	DA,113,ASYM	\$DA,129,ASYM	\$DA,132,ASYM
	DA,135,ASYM	\$DA,142,ASYM	\$DA,145,ASYM
	DA,149,ASYM	\$DA,138,ASYM	\$DA,153,ASYM
	DA,155,ASYM	\$DA,157,ASYM	\$DA,179,ASYM
	DA,163,ASYM	\$DA,167,ASYM	\$DA,159,ASYM
	DA,170,ASYM	\$DA,173,ASYM	\$DA,176,ASYM
	DA,183,ASYM	\$DA,185,ASYM	\$DA,188,ASYM
	DA,180,ASYM	\$DA,191,ASYM	\$DA,193,ASYM
	DA,195,ASYM	\$DA,137,ASYM	\$DA,127,ASYM
	DA,190,ASYM	\$DA,196,ASYM	\$DA,158,ASYM
	DA,151,ASYM	\$DA,168,ASYM	\$DA,177,ASYM
	!	* = SEGUNDO MALLADO = *	
	FLST,5,28,6,ORDE,2		
	FITEM,5,29		
	FITEM,5,-56		
	CM,_Y,VOLU		
	VSEL,, , ,P51X		
	CM,_Y1,VOLU		
	CHKMSH,'VOLU'		
	CMSEL,S,_Y		
	!* VMESH,_Y1		
	!* CMDELE,_Y		
	CMDELE,_Y1		
	CMDELE,_Y2		
	!* + TERCERA EXTRUSIÓN +		
	FLST,2,28,5,ORDE,2		
	FITEM,2,1		
	FITEM,2,-28		
	VEXT,P51X, , ,0,0,-0.9,,,		
	!	* PROPIEDADES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *	
	VSEL,s,volu,,57,59	!Propiedades del Aire	
	VATT,2,1,1		
	VSEL,S,VOLU,,61,62		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,S,VOLU,,64,66		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,68,69		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,71,72		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,77		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,74,75		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,78,80		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,82,83		
	VATT,2,1,1		
	VSEL,s,volu,,60	!Propiedades del Acero	
	VATT,3,1,1		
	VSEL,s,volu,,63		
	VATT,3,1,1		
	VSEL,s,volu,,70		
	VATT,3,1,1		
	VSEL,S,VOLU,,67		
	VATT,3,1,1		
	VSEL,S,VOLU,,73		
	VATT,3,1,1		

```

VSEL,s,volu,,76
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,84
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,81
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

```

```

!          * CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *

```

DA,226,ASYM	\$DA,229,ASYM	\$DA,233,ASYM
DA,222,ASYM	\$DA,237,ASYM	\$DA,239,ASYM
DA,241,ASYM	\$DA,202,ASYM	\$DA,205,ASYM
DA,209,ASYM	\$DA,197,ASYM	\$DA,213,ASYM
DA,216,ASYM	\$DA,219,ASYM	\$DA,267,ASYM
DA,269,ASYM	\$DA,272,ASYM	\$DA,264,ASYM
DA,275,ASYM	\$DA,277,ASYM	\$DA,279,ASYM
DA,263,ASYM	\$DA,247,ASYM	\$DA,251,ASYM
DA,243,ASYM	\$DA,254,ASYM	\$DA,257,ASYM
DA,260,ASYM	\$DA,221,ASYM	\$DA,211,ASYM
DA,274,ASYM	\$DA,280,ASYM	\$DA,242,ASYM
DA,235,ASYM	\$DA,252,ASYM	\$DA,261,ASYM

```

!          * = TERCER MALLADO = *

```

```

FLST,5,28,6,ORDE,2
FITEM,5,57
FITEM,5,-84
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```


CODIGO DE UN BORDE A 45°				
/PREP7		LSTR,43,40		
/Titulo, 3-D Análisis de tubería "CONDICION DE FALLA 45°"		LSTR,44,41		
ET,1,SOLID97	!Define el tipo de elemento	LSTR,45,42		
/units,si	!Selección de unidades	LOVLAP,all	!Generar nuevas líneas	
MP,MURX,1,1.2	!Permeabilidad del imán en X	LSTR,38,40		
MP,MURY,1,1.2	!Permeabilidad del imán en Y	LSTR,38,42		
MP,MURZ,1,1.2	!Permeabilidad del imán en Z	LSTR,41,40		
MP,MGY,1,868000	!Magnetización del imán	LSTR,41,42		
MP,MURX,2,1	!Permeabilidad del aire	LSTR,7,37		
MP,MURX,3,2000	!Permeabilidad del acero	LSTR,6,37		
		LDELE,136,0		
		LDELE,137,0		
!	* DIMENSIONES DEL IMÁN *	LDELE,138,0		
BLC4,0,0,0.0127,0.101855		LDELE,139,0		
BLC4,-0.0127,0.0127,0.101855		KDELE,49		
BLC4,-0.0127,-0.101855,0.0127,0.101855		KDELE,50		
BLC4,0,-0.101855,0.0127,0.101855		KDELE,51		
		KDELE,52		
!	* DIMENSIÓN RADIAL DEL TUBO *	LOVLAP,all		
CYL4,0,0,0, ,0.1026437091				
CYL4,0,0,0, ,0.1204834182		!	* Generar áreas *	
CYL4,0,0,0, ,0.125401		AL,1,16,17,136	\$AL,23,16,36,35	\$AL,36,33,100,118
CYL4,0,0,0, ,0.127255		AL,57,100,79,156	\$AL,61,79,7,15	\$AL,65,7,11,20
CYL4,0,0,0, ,0.136525		AL,69,11,13,18	\$AL,15,157,75	\$AL,14,157,77
ADELE,all	!Borrar Áreas	AL,75,20,158,78	\$AL,77,37,158,130	\$AL,78,18,134,132
csys,1		AL,130,19,134,133	\$AL,35,24,118,88	\$AL,88,84,156,150
K, ,0.136525,224.55,		AL,14,150,76,140	\$AL,37,76,128,154	\$AL,19,128,135,155
K, ,0.07,45,		AL,136,25,24,3	\$AL,3,44,46	\$AL,44,58,84,96
K, ,0.136525,225.45,		AL,96,62,140,82	\$AL,82,66,154,91	\$AL,91,70,155,108
K, ,0.07,135,		AL,39,27,17,74	\$AL,26,43,27,38	\$AL,34,101,43,119
K, ,0.07,225,		AL,59,101,114,164	\$AL,63,114,85,163	\$AL,67,85,98,162
K, ,0.07,315,		AL,71,98,112,122	\$AL,38,119,29,102	\$AL,164,102,151,93
K, ,0.136525,135,		AL,163,151,159,147	\$AL,162,159,165,148	\$AL,122,165,125,149
K, ,0.136525,225,		AL,74,29,25,45	\$AL,45,46,49	\$AL,49,93,58,97
K, ,0.136525,315,		AL,97,147,62,83	\$AL,83,148,66,92	\$AL,92,149,70,111
K, ,0.136525,44.55,		AL,39,21,28,137	\$AL,26,28,50,51	\$AL,34,50,103,120
K, ,0.136525,45,		AL,59,103,115,170	\$AL,63,115,86,169	\$AL,67,86,99,168
K, ,0.136525,45.45,		AL,71,99,113,126	\$AL,51,120,30,104	\$AL,170,104,152,95
csys,0		AL,169,152,160,146	\$AL,168,160,166,145	\$AL,126,166,127,144
K, ,0.0127,0.136525,		AL,137,30,31,9	\$AL,9,54,52	\$AL,52,60,95,109
K, ,-0.0127,0.136525,		AL,109,146,64,89	\$AL,89,145,68,123	\$AL,123,144,72,116
K, ,0.0127,-0.136525,		AL,1,21,22,138	\$AL,22,23,73,55	\$AL,55,33,121,106
K, ,-0.0127,-0.136525,		AL,57,106,80,171	\$AL,61,80,81,172	\$AL,65,81,90,173
!	Generar puntos de la Grieta	AL,69,90,107,131	\$AL,73,121,32,105	\$AL,171,105,153,94
LSTR,34,36		AL,172,153,161,143	\$AL,173,161,167,142	\$AL,131,167,129,141
LSTR,35,33		AL,138,31,32,53	\$AL,53,54,56	\$AL,56,60,94,110
LOVLAP,all		AL,110,64,143,87	\$AL,87,68,142,124	\$AL,124,72,141,117
LSTR,46,39				
LSTR,48,37		!	=+ PRIMERA EXTRUSIÓN +=	
FLST,2,5,4,ORDE,5		FLST,2,78,5,ORDE,2		
FITEM,2,5		FITEM,2,1		
FITEM,2,-6		FITEM,2,-78		
FITEM,2,25		VEXT,P51X, , ,0,0,0.0254, , , ,		
FITEM,2,29				
FITEM,2,33		!	* PROPIEDADES DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *	
LOVLAP,P51X		VSEL,S,VOLU,,1		
LDELE,15,0		VATT,1,1,1	!Propiedades del Imán	
LDELE,16,0		VSEL,S,VOLU,,19		
KDELE,37		VATT,1,1,1		
KDELE,39		VSEL,s,volu,,25		
LSTR,49,3		VATT,1,1,1		
LSTR,50,8		VSEL,s,volu,,37		
LSTR,51,14		VATT,1,1,1		
LSTR,52,9		VSEL,s,volu,,61		
LSTR,47,38		VATT,1,1,1		

VSEL,s,volu,,73		DA,106,ASYM	\$DA,288,ASYM	\$DA,304,ASYM
VATT,1,1,1		DA,316,ASYM	\$DA,213,ASYM	\$DA,201,ASYM
VSEL,s,volu,,43		DA,185,ASYM	\$DA,234,ASYM	\$DA,250,ASYM
VATT,1,1,1		DA,267,ASYM	\$DA,19,ASYM	\$DA,37,ASYM
VSEL,s,volu,,55		DA,1,ASYM	\$DA,25,ASYM	\$DA,61,ASYM
VATT,1,1,1		DA,43,ASYM	\$DA,73,ASYM	\$DA,55,ASYM
VSEL,s,volu,,2,6	!Propiedades del Aire			
VATT,2,1,1		!	* DIVISIONES DEL 1er. MALLADO *	
VSEL,S,VOLU,,8,11		LESIZE,195,,,11,,,,,0	\$LESIZE,229,,,11,,,,,0	\$LESIZE,298,,,11,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,281,,,11,,,,,0	LESIZE,326,,,11,,,,,0	\$LESIZE,342,,,11,,,,,0
VSEL,S,VOLU,,14,17		LESIZE,396,,,11,,,,,0	\$LESIZE,380,,,11,,,,,0	\$LESIZE,194,,,3,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,189,,,2,,,,,0	\$LESIZE,184,,,4,,,,,0	\$LESIZE,179,,,14,,,,,0
VSEL,s,volu,,20,23		LESIZE,305,,,4,,,,,0	\$LESIZE,247,,,4,,,,,0	\$LESIZE,249,,,4,,,,,0
VATT,2,1,1				
VSEL,s,volu,,38,41		!	* MALLADO 1 *	
VATT,2,1,1		VMESH,ALL		
VSEL,s,volu,,26,30				
VATT,2,1,1		!	=+ SEGUNDA EXTRUSIÓN +=	
VSEL,s,volu,,32,35		FLST,2,78,5,ORDE,78		
VATT,2,1,1		FITEM,2,79		
VSEL,s,volu,,44,48		FITEM,2,84		
VATT,2,1,1		FITEM,2,88		
VSEL,s,volu,,50,53		FITEM,2,92		
VATT,2,1,1		FITEM,2,96		
VSEL,s,volu,,56,59		FITEM,2,100		
VATT,2,1,1		FITEM,2,104		
VSEL,s,volu,,74,77		FITEM,2,108		
VATT,2,1,1		FITEM,2,111		
VSEL,s,volu,,62,66		FITEM,2,114		
VATT,2,1,1		FITEM,2,117		
VSEL,S,VOLU,,68,71		FITEM,2,120		
VATT,2,1,1		FITEM,2,123		
VSEL,s,volu,,7	!Propiedades del Acero	FITEM,2,126		
VATT,3,1,1		FITEM,2,129		
VSEL,s,volu,,12,13		FITEM,2,132		
VATT,3,1,1		FITEM,2,135		
VSEL,s,volu,,18		FITEM,2,138		
VATT,3,1,1		FITEM,2,141		
VSEL,S,VOLU,,24		FITEM,2,144		
VATT,3,1,1		FITEM,2,147		
VSEL,S,VOLU,,42		FITEM,2,150		
VATT,3,1,1		FITEM,2,153		
VSEL,s,volu,,36		FITEM,2,156		
VATT,3,1,1		FITEM,2,159		
VSEL,s,volu,,31		FITEM,2,163		
VATT,3,1,1		FITEM,2,167		
VSEL,s,volu,,49		FITEM,2,171		
VATT,3,1,1		FITEM,2,175		
VSEL,s,volu,,54		FITEM,2,179		
VATT,3,1,1		FITEM,2,183		
VSEL,s,volu,,60		FITEM,2,187		
VATT,3,1,1		FITEM,2,190		
VSEL,s,volu,,78		FITEM,2,193		
VATT,3,1,1		FITEM,2,196		
VSEL,s,volu,,72		FITEM,2,199		
VATT,3,1,1		FITEM,2,202		
VSEL,s,volu,,67		FITEM,2,204		
VATT,3,1,1		FITEM,2,206		
ALLSEL,ALL		FITEM,2,208		
		FITEM,2,210		
!	* CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *	FITEM,2,212		
DA,202,ASYM	\$DA,141,ASYM	\$DA,79,ASYM	FITEM,2,214	
DA,159,ASYM	\$DA,269,ASYM	\$DA,214,ASYM	FITEM,2,218	
DA,305,ASYM	\$DA,251,ASYM	\$DA,157,ASYM	FITEM,2,221	
DA,139,ASYM	\$DA,124,ASYM	\$DA,122,ASYM	FITEM,2,224	

FITEM,2,227	VSEL,s,volu,,96
FITEM,2,230	VATT,3,1,1
FITEM,2,233	VSEL,S,VOLU,,102
FITEM,2,236	VATT,3,1,1
FITEM,2,239	VSEL,S,VOLU,,120
FITEM,2,242	VATT,3,1,1
FITEM,2,245	VSEL,s,volu,,114
FITEM,2,248	VATT,3,1,1
FITEM,2,251	VSEL,s,volu,,109
FITEM,2,254	VATT,3,1,1
FITEM,2,257	VSEL,s,volu,,127
FITEM,2,260	VATT,3,1,1
FITEM,2,263	VSEL,s,volu,,132
FITEM,2,266	VATT,3,1,1
FITEM,2,269	VSEL,s,volu,,138
FITEM,2,272	VATT,3,1,1
FITEM,2,275	VSEL,s,volu,,156
FITEM,2,278	VATT,3,1,1
FITEM,2,281	VSEL,s,volu,,150
FITEM,2,284	VATT,3,1,1
FITEM,2,287	VSEL,s,volu,,145
FITEM,2,290	VATT,3,1,1
FITEM,2,293	ALLSEL,ALL
FITEM,2,296	
FITEM,2,299	!
FITEM,2,302	* CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 2da. EXTRUSIÓN *
FITEM,2,305	DA,317,ASYM \$DA,322,ASYM \$DA,326,ASYM
FITEM,2,307	DA,330,ASYM \$DA,334,ASYM \$DA,338,ASYM
FITEM,2,309	DA,342,ASYM \$DA,346,ASYM \$DA,349,ASYM
FITEM,2,311	DA,352,ASYM \$DA,355,ASYM \$DA,358,ASYM
FITEM,2,313	DA,361,ASYM \$DA,364,ASYM \$DA,367,ASYM
FITEM,2,315	DA,370,ASYM \$DA,373,ASYM \$DA,376,ASYM
VEXT,P51X,,0,0,0.9,,,	DA,379,ASYM \$DA,382,ASYM \$DA,385,ASYM
	DA,388,ASYM \$DA,391,ASYM \$DA,394,ASYM
	DA,397,ASYM \$DA,401,ASYM \$DA,405,ASYM
!	DA,409,ASYM \$DA,413,ASYM \$DA,417,ASYM
* PROPIEDADES DE LA 2da. EXTRUSIÓN	DA,421,ASYM \$DA,425,ASYM \$DA,428,ASYM
VSEL,s,volu,,79,84 !Propiedades del Aire	DA,431,ASYM \$DA,434,ASYM \$DA,437,ASYM
VATT,2,1,1	DA,440,ASYM \$DA,442,ASYM \$DA,444,ASYM
VSEL,S,VOLU,,86,89	DA,446,ASYM \$DA,448,ASYM \$DA,450,ASYM
VATT,2,1,1	DA,452,ASYM \$DA,456,ASYM \$DA,459,ASYM
VSEL,S,VOLU,,92,95	DA,462,ASYM \$DA,465,ASYM \$DA,468,ASYM
VATT,2,1,1	DA,471,ASYM \$DA,474,ASYM \$DA,477,ASYM
VSEL,s,volu,,97,101	DA,480,ASYM \$DA,483,ASYM \$DA,486,ASYM
VATT,2,1,1	DA,489,ASYM \$DA,492,ASYM \$DA,495,ASYM
VSEL,s,volu,,103,108	DA,498,ASYM \$DA,501,ASYM \$DA,504,ASYM
VATT,2,1,1	DA,507,ASYM \$DA,510,ASYM \$DA,513,ASYM
VSEL,s,volu,,110,113	DA,516,ASYM \$DA,519,ASYM \$DA,522,ASYM
VATT,2,1,1	DA,525,ASYM \$DA,528,ASYM \$DA,531,ASYM
VSEL,s,volu,,115,119	DA,534,ASYM \$DA,537,ASYM \$DA,540,ASYM
VATT,2,1,1	DA,543,ASYM \$DA,545,ASYM \$DA,547,ASYM
VSEL,s,volu,,121,126	DA,549,ASYM \$DA,551,ASYM \$DA,553,ASYM
VATT,2,1,1	DA,395,ASYM \$DA,377,ASYM \$DA,362,ASYM
VSEL,s,volu,,128,131	DA,360,ASYM \$DA,344,ASYM \$DA,526,ASYM
VATT,2,1,1	DA,542,ASYM \$DA,554,ASYM \$DA,451,ASYM
VSEL,s,volu,,133,137	DA,439,ASYM \$DA,423,ASYM \$DA,472,ASYM
VATT,2,1,1	DA,488,ASYM \$DA,505,ASYM
VSEL,s,volu,,139,144	
VATT,2,1,1	!
VSEL,s,volu,,146,149	*+ SEGUNDO MALLADO +*
VATT,2,1,1	FLST,5,78,6,ORDE,2
VSEL,S,VOLU,,151,155	FITEM,5,79
VATT,2,1,1	FITEM,5,-156
VSEL,s,volu,,85 !Propiedades del Acero	CM,_Y,VOLU
VATT,3,1,1	VSEL,, , ,P51X
VSEL,s,volu,,90,91	CM,_Y1,VOLU
VATT,3,1,1	CHKMSH,'VOLU'

```

CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          ==+ TERCERA EXTRUSIÓN ==
FLST,2,78,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-78
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.134525,,

!          * PROPIEDADES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN
VSEL,s,volu,,157,162      !Propiedades del Aire
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,164,167
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,170,173
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,175,179
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,181,186
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,188,191
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,193,197
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,199,204
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,206,209
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,211,215
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,217,222
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,224,227
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,229,233
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,163          !Propiedades del Acero
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,168,169
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,174
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,180
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,198
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,192
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,187
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,205
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,210
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,216
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,234
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,228

VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,223
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

!          *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 3ra. EXTRUSIÓN +*
DA,633,ASYM          $DA,615,ASYM          $DA,600,ASYM
DA,598,ASYM          $DA,582,ASYM          $DA,764,ASYM
DA,780,ASYM          $DA,792,ASYM          $DA,689,ASYM
DA,677,ASYM          $DA,661,ASYM          $DA,710,ASYM
DA,726,ASYM          $DA,743,ASYM

!          *+ DIVISIONES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN +*
LESIZE,735,,2,,,,,0

!          ==+ TERCER MALLADO ==
FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,157
FITEM,5,-234
CM,_Y,VOLU
VSEL,,, ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          ==+ CUARTA EXTRUSIÓN ==
FLST,2,78,5,ORDE,78
FITEM,2,555
FITEM,2,560
FITEM,2,564
FITEM,2,568
FITEM,2,572
FITEM,2,576
FITEM,2,580
FITEM,2,584
FITEM,2,587
FITEM,2,590
FITEM,2,593
FITEM,2,596
FITEM,2,599
FITEM,2,602
FITEM,2,605
FITEM,2,608
FITEM,2,611
FITEM,2,614
FITEM,2,617
FITEM,2,620
FITEM,2,623
FITEM,2,626
FITEM,2,629
FITEM,2,632
FITEM,2,635
FITEM,2,639
FITEM,2,643
FITEM,2,647
FITEM,2,651
FITEM,2,655
FITEM,2,659

```

```

FITEM,2,663
FITEM,2,666
FITEM,2,669
FITEM,2,672
FITEM,2,675
FITEM,2,678
FITEM,2,680
FITEM,2,682
FITEM,2,684
FITEM,2,686
FITEM,2,688
FITEM,2,690
FITEM,2,694
FITEM,2,697
FITEM,2,700
FITEM,2,703
FITEM,2,706
FITEM,2,709
FITEM,2,712
FITEM,2,715
FITEM,2,718
FITEM,2,721
FITEM,2,724
FITEM,2,727
FITEM,2,730
FITEM,2,733
FITEM,2,736
FITEM,2,739
FITEM,2,742
FITEM,2,745
FITEM,2,748
FITEM,2,751
FITEM,2,754
FITEM,2,757
FITEM,2,760
FITEM,2,763
FITEM,2,766
FITEM,2,769
FITEM,2,772
FITEM,2,775
FITEM,2,778
FITEM,2,781
FITEM,2,783
FITEM,2,785
FITEM,2,787
FITEM,2,789
FITEM,2,791
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.004,,,,

!          * PROPIEDADES DE LA 4ta. EXTRUSIÓN *
VSEL,s,volu,,235,240      !Propiedades del Aire
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,242,243
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,248,251
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,253,257
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,259,264
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,266,269
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,271,275
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,277,282

VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,284,287
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,289,293
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,295,300
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,302,305
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,307,311
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,241          !Propiedades del Acero
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,252
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,258
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,276
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,270
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,265
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,283
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,288
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,294
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,312
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,306
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,301
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,244,247
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

!          +- CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 4ta. EXTRUSIÓN +-
DA,871,ASYM          $DA,853,ASYM          $DA,838,ASYM
DA,836,ASYM          $DA,820,ASYM          $DA,1002,ASYM
DA,1018,ASYM         $DA,1030,ASYM          $DA,927,ASYM
DA,915,ASYM          $DA,899,ASYM          $DA,948,ASYM
DA,964,ASYM          $DA,981,ASYM

!          += CUARTO MALLADO +=
FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,235
FITEM,5,-312
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          += QUINTA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,78

```

FITEM,2,793	FITEM,2,998
FITEM,2,798	FITEM,2,1001
FITEM,2,802	FITEM,2,1004
FITEM,2,806	FITEM,2,1007
FITEM,2,810	FITEM,2,1010
FITEM,2,814	FITEM,2,1013
FITEM,2,818	FITEM,2,1016
FITEM,2,822	FITEM,2,1019
FITEM,2,825	FITEM,2,1021
FITEM,2,828	FITEM,2,1023
FITEM,2,831	FITEM,2,1025
FITEM,2,834	FITEM,2,1027
FITEM,2,837	FITEM,2,1029
FITEM,2,840	VEXT,P51X, , ,0,0,-0.761475,,,
FITEM,2,843	
FITEM,2,846	! * PROPIEDADES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN *
FITEM,2,849	VSEL,s,volu,,313,318 !Propiedades del Aire
FITEM,2,852	VATT,2,1,1
FITEM,2,855	VSEL,S,VOLU,,320,323
FITEM,2,858	VATT,2,1,1
FITEM,2,861	VSEL,S,VOLU,,326,329
FITEM,2,864	VATT,2,1,1
FITEM,2,867	VSEL,s,volu,,331,335
FITEM,2,870	VATT,2,1,1
FITEM,2,873	VSEL,s,volu,,337,342
FITEM,2,877	VATT,2,1,1
FITEM,2,881	VSEL,s,volu,,344,347
FITEM,2,885	VATT,2,1,1
FITEM,2,889	VSEL,s,volu,,349,353
FITEM,2,893	VATT,2,1,1
FITEM,2,897	VSEL,s,volu,,355,360
FITEM,2,901	VATT,2,1,1
FITEM,2,904	VSEL,s,volu,,362,365
FITEM,2,907	VATT,2,1,1
FITEM,2,910	VSEL,s,volu,,367,371
FITEM,2,913	VATT,2,1,1
FITEM,2,916	VSEL,s,volu,,373,378
FITEM,2,918	VATT,2,1,1
FITEM,2,920	VSEL,s,volu,,380,383
FITEM,2,922	VATT,2,1,1
FITEM,2,924	VSEL,S,VOLU,,385,389
FITEM,2,926	VATT,2,1,1
FITEM,2,928	VSEL,s,volu,,319 !Propiedades del Acero
FITEM,2,932	VATT,3,1,1
FITEM,2,935	VSEL,s,volu,,324,325
FITEM,2,938	VATT,3,1,1
FITEM,2,941	VSEL,s,volu,,330
FITEM,2,944	VATT,3,1,1
FITEM,2,947	VSEL,S,VOLU,,336
FITEM,2,950	VATT,3,1,1
FITEM,2,953	VSEL,S,VOLU,,354
FITEM,2,956	VATT,3,1,1
FITEM,2,959	VSEL,s,volu,,348
FITEM,2,962	VATT,3,1,1
FITEM,2,965	VSEL,s,volu,,343
FITEM,2,968	VATT,3,1,1
FITEM,2,971	VSEL,s,volu,,361
FITEM,2,974	VATT,3,1,1
FITEM,2,977	VSEL,s,volu,,366
FITEM,2,980	VATT,3,1,1
FITEM,2,983	VSEL,s,volu,,372
FITEM,2,986	VATT,3,1,1
FITEM,2,989	VSEL,s,volu,,390
FITEM,2,992	VATT,3,1,1
FITEM,2,995	VSEL,s,volu,,384

VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,379
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

! *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

DA,1111,ASYM	\$DA,1115,ASYM	\$DA,1119,ASYM
DA,1123,ASYM	\$DA,1127,ASYM	\$DA,1131,ASYM
DA,1135,ASYM	\$DA,1139,ASYM	\$DA,1142,ASYM
DA,1145,ASYM	\$DA,1148,ASYM	\$DA,1151,ASYM
DA,1154,ASYM	\$DA,1156,ASYM	\$DA,1158,ASYM
DA,1160,ASYM	\$DA,1162,ASYM	\$DA,1164,ASYM
DA,1031,ASYM	\$DA,1036,ASYM	\$DA,1040,ASYM
DA,1044,ASYM	\$DA,1048,ASYM	\$DA,1052,ASYM
DA,1056,ASYM	\$DA,1060,ASYM	\$DA,1063,ASYM
DA,1066,ASYM	\$DA,1069,ASYM	\$DA,1072,ASYM
DA,1075,ASYM	\$DA,1078,ASYM	\$DA,1081,ASYM
DA,1084,ASYM	\$DA,1087,ASYM	\$DA,1090,ASYM
DA,1093,ASYM	\$DA,1096,ASYM	\$DA,1099,ASYM
DA,1102,ASYM	\$DA,1105,ASYM	\$DA,1108,ASYM
DA,1221,ASYM	\$DA,1224,ASYM	\$DA,1227,ASYM
DA,1230,ASYM	\$DA,1233,ASYM	\$DA,1236,ASYM
DA,1239,ASYM	\$DA,1242,ASYM	\$DA,1245,ASYM
DA,1248,ASYM	\$DA,1251,ASYM	\$DA,1254,ASYM
DA,1257,ASYM	\$DA,1259,ASYM	\$DA,1261,ASYM
DA,1263,ASYM	\$DA,1265,ASYM	\$DA,1267,ASYM
DA,1166,ASYM	\$DA,1170,ASYM	\$DA,1173,ASYM
DA,1176,ASYM	\$DA,1179,ASYM	\$DA,1182,ASYM
DA,1185,ASYM	\$DA,1188,ASYM	\$DA,1191,ASYM
DA,1194,ASYM	\$DA,1197,ASYM	\$DA,1200,ASYM
DA,1203,ASYM	\$DA,1206,ASYM	\$DA,1209,ASYM
DA,1212,ASYM	\$DA,1215,ASYM	\$DA,1218,ASYM
DA,1109,ASYM	\$DA,1091,ASYM	\$DA,1076,ASYM
DA,1074,ASYM	\$DA,1058,ASYM	\$DA,1240,ASYM
DA,1256,ASYM	\$DA,1268,ASYM	\$DA,1165,ASYM
DA,1153,ASYM	\$DA,1137,ASYM	\$DA,1186,ASYM
DA,1202,ASYM	\$DA,1219,ASYM	

! *+ DIVISIONES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

LESIZE,1221,,,13,,,,,0

! =+ QUINTO MALLADO =+

FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,313
FITEM,5,-390
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

CODIGO PARA UNA CORROSIÓN A 45°

```

/PREP7
/Titulo, 3-D Análisis de tubería "CONDICION DE CORROSIÓN 45""
ET,1,SOLID97          !Define el tipo de elemento
/units,si              !Selección de unidades
MP,MURX,1,1.2          !Permeabilidad del imán en X
MP,MURY,1,1.2          !Permeabilidad del imán en Y
MP,MURZ,1,1.2          !Permeabilidad del imán en Z
MP,MGY,1,868000        !Magnetización del imán
MP,MURX,2,1            !Permeabilidad del aire
MP,MURX,3,2000         !Permeabilidad del acero

!          * DIMENSIONES DEL IMÁN *
BLC4,0,0,0.0127,0.101855
BLC4,-0.0127,0,0.0127,0.101855
BLC4,-0.0127,-0.101855,0.0127,0.101855
BLC4,0,-0.101855,0.0127,0.101855

!          * DIMENSIÓN RADIAL DEL TUBO *
CYL4,0,0,0, ,0.1026437091
CYL4,0,0,0, ,0.12233274182
CYL4,0,0,0, ,0.127255
CYL4,0,0,0, ,0.129109
CYL4,0,0,0, ,0.130963
CYL4,0,0,0, ,0.132817
CYL4,0,0,0, ,0.136525
ADELE,all
csys,1
K, ,0.136525,224.4,
K, ,0.136525,224.6,
K, ,0.136525,224.8,
K, ,0.07,45,
K, ,0.136525,225.2,
K, ,0.136525,225.4,
K, ,0.136525,225.6,
K, ,0.07,135,
K, ,0.07,225,
K, ,0.07,315,
K, ,0.136525,135,
K, ,0.136525,225,
K, ,0.136525,315,
K, ,0.136525,44.4,
K, ,0.136525,44.6,
K, ,0.136525,44.8,
K, ,0.136525,45,
K, ,0.136525,45.2,
K, ,0.136525,45.4,
K, ,0.136525,45.6,
csys,0
K, ,0.0127,0.136525,
K, ,-0.0127,0.136525,
K, ,0.0127,-0.136525,
K, ,-0.0127,-0.136525,
LSTR,41,43
LSTR,42,44
LOVLAP,all
LSTR,45,64
LSTR,46,63
LSTR,47,62
LSTR,49,60
LSTR,50,59
LSTR,51,58
FLST,2,11,4,ORDE,9
FITEM,2,5
FITEM,2,-7

```

```

FITEM,2,10
FITEM,2,-12
FITEM,2,25
FITEM,2,29
FITEM,2,33
FITEM,2,37
FITEM,2,41
LOVLAP,P51X
LDELE,89,0
LDELE,90,0
LDELE,91,0
LDELE,92,0
LDELE,93,0
LDELE,94,0
KDELE,45
KDELE,46
KDELE,47
KDELE,49
KDELE,50
KDELE,51
LSTR,65,67
LSTR,66,68
LSTR,61,48
LSTR,55,52
LSTR,56,53
LSTR,57,54
LSTR,48,52
LSTR,48,54
LSTR,53,52
LSTR,53,54
LOVLAP,all
LSTR,6,93
LSTR,7,93
LSTR,70,93
LSTR,71,93
LSTR,72,93
LSTR,73,93
LSTR,133,93
LDELE,233,0
LDELE,234,0
LDELE,235,0
LDELE,236,0
KDELE,65
KDELE,66
KDELE,67
KDELE,68

!          * Generar áreas *
AL,1,41,91,291          $AL,92,91,201,200          $AL,196,201,197,199
AL,65,197,257,153      $AL,69,153,13,2          $AL,73,13,15,121
AL,77,15,17,122        $AL,81,17,19,123          $AL,85,19,45,96
AL,2,8,128              $AL,8,7,127              $AL,7,258,239,
AL,258,6,238            $AL,6,5,125              $AL,5,4,124
AL,128,121,118,133     $AL,127,118,115,132          $AL,239,115,259,244
AL,238,259,112,242     $AL,125,112,109,130          $AL,124,109,106,129
AL,133,122,119,138     $AL,132,119,116,137          $AL,244,116,260,245
AL,242,260,113,243     $AL,130,113,110,135          $AL,129,110,107,134
AL,138,123,120,143     $AL,137,120,117,142          $AL,245,117,261,240
AL,243,261,114,241     $AL,135,114,111,140          $AL,134,111,108,139
AL,143,96,98,95        $AL,142,98,100,97          $AL,240,100,231,229
AL,241,231,102,230     $AL,140,102,104,101          $AL,139,104,105,103
AL,200,199,93,144      $AL,144,257,94,286          $AL,4,286,149,271
AL,106,149,151,272     $AL,107,151,152,273          $AL,108,152,237,274
AL,105,237,232,275     $AL,291,145,93,3           $AL,3,54,52
AL,52,66,94,155        $AL,155,70,271,158          $AL,158,74,272,161

```


AL,161,78,273,166	\$AL,166,82,274,169	\$AL,169,86,275,189	VATT,2,1,1	
AL,47,147,41,290	\$AL,148,208,147,207	\$AL,225,226,208,206	VSEL,s,volu,,80,83	
AL,67,177,226,266	\$AL,71,177,182,265	\$AL,75,182,170,264	VATT,2,1,1	
AL,79,170,173,263	\$AL,83,173,175,262	\$AL,87,175,190,217	VSEL,s,volu,,88,90	
AL,207,206,205,209	\$AL,209,266,204,287	\$AL,265,287,292,251	VATT,2,1,1	
AL,264,292,295,250	\$AL,263,295,298,249	\$AL,262,298,303,248	VSEL,s,volu,,96,98	
AL,217,303,218,247	\$AL,290,205,145,53	\$AL,53,54,57	VATT,2,1,1	
AL,57,204,66,156	\$AL,156,251,70,159	\$AL,159,250,74,164	VSEL,s,volu,,104,107	
AL,164,249,78,167	\$AL,167,248,82,172	\$AL,172,247,86,188	VATT,2,1,1	
AL,47,146,89,301	\$AL,148,212,146,213	\$AL,225,227,212,211	VSEL,s,volu,,112,114	
AL,67,178,227,280	\$AL,71,178,184,279	\$AL,75,184,171,278	VATT,2,1,1	
AL,79,171,174,277	\$AL,83,174,176,276	\$AL,87,176,191,219	VSEL,S,VOLU,,120,122	
AL,213,211,203,210	\$AL,210,280,202,288	\$AL,288,279,252,293	VATT,2,1,1	
AL,293,278,253,296	\$AL,296,277,254,299	\$AL,299,276,255,304	VSEL,s,volu,,6,9	!Propiedades del Acero
AL,304,219,256,220	\$AL,301,203,150,9	\$AL,9,62,60	VATT,3,1,1	
AL,60,202,68,162	\$AL,162,252,72,183	\$AL,183,253,76,192	VSEL,s,volu,,16,39	
AL,192,254,80,186	\$AL,186,255,84,179	\$AL,179,256,88,194	VATT,3,1,1	
AL,1,89,90,302	\$AL,92,90,215,216	\$AL,196,215,198,214	VSEL,s,volu,,43,46	
AL,65,198,154,281	\$AL,69,154,157,282	\$AL,73,157,160,283	VATT,3,1,1	
AL,77,160,165,284	\$AL,81,165,168,285	\$AL,85,168,181,223	VSEL,S,VOLU,,51,54	
AL,216,214,222,228	\$AL,228,281,221,289	\$AL,282,289,294,270	VATT,3,1,1	
AL,283,294,297,269	\$AL,284,297,300,268	\$AL,285,300,305,267	VSEL,S,VOLU,,75,78	
AL,223,305,224,246	\$AL,302,150,222,61	\$AL,61,62,64	VATT,3,1,1	
AL,64,68,221,163	\$AL,163,72,270,185	\$AL,185,76,269,193	VSEL,s,volu,,67,70	
AL,193,80,268,187	\$AL,187,84,267,180	\$AL,180,88,246,195	VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,60,63	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,84,87	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,91,94	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,99,102	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,123,126	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,115,118	
			VATT,3,1,1	
			VSEL,s,volu,,108,111	
			VATT,3,1,1	
			ALLSEL,ALL	
!	= + PRIMERA EXTRUSIÓN + =		!	= + CONDICIONES DE FRONTERA DE LA PRIMERA EXTRUSIÓN +
!	=====		=	
FLST,2,126,5,ORDE,2			DA,356,ASYM	\$DA,275,ASYM \$DA,299,ASYM
FITEM,2,1			DA,127,ASYM	\$DA,372,ASYM \$DA,445,ASYM
FITEM,2,-126			DA,421,ASYM	\$DA,493,ASYM \$DA,297,ASYM
VEXT,P51X,, ,0,0,0.0254,.,.,			DA,274,ASYM	\$DA,252,ASYM \$DA,250,ASYM
			DA,246,ASYM	\$DA,244,ASYM \$DA,241,ASYM
			DA,238,ASYM	\$DA,162,ASYM \$DA,470,ASYM
			DA,492,ASYM	\$DA,508,ASYM \$DA,371,ASYM
			DA,355,ASYM	\$DA,333,ASYM \$DA,398,ASYM
			DA,420,ASYM	\$DA,443,ASYM \$DA,47,ASYM
			DA,71,ASYM	\$DA,1,ASYM \$DA,55,ASYM
			DA,103,ASYM	\$DA,79,ASYM \$DA,119,ASYM
			DA,95,ASYM	
			!	* DIVISIONES DEL 1er. MALLADO*
			LESIZE,141,,,11,,,,,0	\$LESIZE,414,,,11,,,,,0 \$LESIZE,504,,,11,,,,,0
			LESIZE,481,,,11,,,,,0	\$LESIZE,540,,,11,,,,,0 \$LESIZE,562,,,11,,,,,0
			LESIZE,612,,,11,,,,,0	\$LESIZE,634,,,11,,,,,0 \$LESIZE,136,,,1,,,,,0
			LESIZE,59,,,1,,,,,0	\$LESIZE,50,,,1,,,,,0 \$LESIZE,43,,,1,,,,,0
			LESIZE,37,,,4,,,,,0	\$LESIZE,32,,,16,,,,,0 \$LESIZE,513,,,2,,,,,0
			LESIZE,437,,,2,,,,,0	\$LESIZE,439,,,2,,,,,0
			!	* MALLADO 1 *

VMESH,ALL	FITEM,2,327
	FITEM,2,331
! + = SEGUNDA EXTRUSIÓN = +	FITEM,2,335
FLST,2,126,5,ORDE,126	FITEM,2,338
FITEM,2,127	FITEM,2,341
FITEM,2,132	FITEM,2,344
FITEM,2,136	FITEM,2,347
FITEM,2,140	FITEM,2,350
FITEM,2,144	FITEM,2,353
FITEM,2,148	FITEM,2,356
FITEM,2,152	FITEM,2,358
FITEM,2,156	FITEM,2,360
FITEM,2,160	FITEM,2,362
FITEM,2,164	FITEM,2,364
FITEM,2,167	FITEM,2,366
FITEM,2,170	FITEM,2,368
FITEM,2,173	FITEM,2,370
FITEM,2,176	FITEM,2,372
FITEM,2,179	FITEM,2,376
FITEM,2,182	FITEM,2,379
FITEM,2,185	FITEM,2,382
FITEM,2,188	FITEM,2,385
FITEM,2,191	FITEM,2,388
FITEM,2,194	FITEM,2,391
FITEM,2,197	FITEM,2,394
FITEM,2,200	FITEM,2,397
FITEM,2,203	FITEM,2,400
FITEM,2,206	FITEM,2,403
FITEM,2,209	FITEM,2,406
FITEM,2,212	FITEM,2,409
FITEM,2,215	FITEM,2,412
FITEM,2,218	FITEM,2,415
FITEM,2,221	FITEM,2,418
FITEM,2,224	FITEM,2,421
FITEM,2,227	FITEM,2,424
FITEM,2,230	FITEM,2,427
FITEM,2,233	FITEM,2,430
FITEM,2,236	FITEM,2,433
FITEM,2,239	FITEM,2,436
FITEM,2,242	FITEM,2,439
FITEM,2,245	FITEM,2,442
FITEM,2,248	FITEM,2,445
FITEM,2,251	FITEM,2,448
FITEM,2,254	FITEM,2,451
FITEM,2,257	FITEM,2,454
FITEM,2,260	FITEM,2,457
FITEM,2,263	FITEM,2,460
FITEM,2,266	FITEM,2,463
FITEM,2,269	FITEM,2,466
FITEM,2,272	FITEM,2,469
FITEM,2,275	FITEM,2,472
FITEM,2,278	FITEM,2,475
FITEM,2,281	FITEM,2,478
FITEM,2,284	FITEM,2,481
FITEM,2,287	FITEM,2,484
FITEM,2,290	FITEM,2,487
FITEM,2,293	FITEM,2,490
FITEM,2,296	FITEM,2,493
FITEM,2,299	FITEM,2,495
FITEM,2,303	FITEM,2,497
FITEM,2,307	FITEM,2,499
FITEM,2,311	FITEM,2,501
FITEM,2,315	FITEM,2,503
FITEM,2,319	FITEM,2,505
FITEM,2,323	FITEM,2,507

VEXT,P51X,,0,0,0.9,,,			DA,570,ASYM	\$DA,567,ASYM	\$DA,564,ASYM
!	* PROPIEDADES DE LA 2da. EXTRUSIÓN		DA,597,ASYM	\$DA,594,ASYM	\$DA,591,ASYM
VSEL,s,volu,,127,131	!Propiedades del Aire		DA,588,ASYM	\$DA,585,ASYM	\$DA,582,ASYM
VATT,2,1,1			DA,615,ASYM	\$DA,612,ASYM	\$DA,609,ASYM
VSEL,S,VOLU,,136,141			DA,606,ASYM	\$DA,603,ASYM	\$DA,600,ASYM
VATT,2,1,1			DA,633,ASYM	\$DA,630,ASYM	\$DA,627,ASYM
VSEL,S,VOLU,,166,168			DA,624,ASYM	\$DA,621,ASYM	\$DA,618,ASYM
VATT,2,1,1			DA,636,ASYM	\$DA,639,ASYM	\$DA,642,ASYM
VSEL,s,volu,,173,176			DA,645,ASYM	\$DA,648,ASYM	\$DA,651,ASYM
VATT,2,1,1			DA,654,ASYM	\$DA,657,ASYM	\$DA,660,ASYM
VSEL,s,volu,,181,185			DA,663,ASYM	\$DA,666,ASYM	\$DA,669,ASYM
VATT,2,1,1			DA,672,ASYM	\$DA,675,ASYM	\$DA,678,ASYM
VSEL,s,volu,,190,192			DA,681,ASYM	\$DA,685,ASYM	\$DA,689,ASYM
VATT,2,1,1			DA,693,ASYM	\$DA,697,ASYM	\$DA,701,ASYM
VSEL,s,volu,,197,200			DA,705,ASYM	\$DA,709,ASYM	\$DA,713,ASYM
VATT,2,1,1			DA,717,ASYM	\$DA,720,ASYM	\$DA,723,ASYM
VSEL,s,volu,,205,209			DA,726,ASYM	\$DA,729,ASYM	\$DA,732,ASYM
VATT,2,1,1			DA,735,ASYM	\$DA,738,ASYM	\$DA,740,ASYM
VSEL,s,volu,,214,216			DA,742,ASYM	\$DA,744,ASYM	\$DA,746,ASYM
VATT,2,1,1			DA,748,ASYM	\$DA,750,ASYM	\$DA,752,ASYM
VSEL,s,volu,,221,224			DA,758,ASYM	\$DA,761,ASYM	\$DA,764,ASYM
VATT,2,1,1			DA,767,ASYM	\$DA,770,ASYM	\$DA,773,ASYM
VSEL,s,volu,,229,233			DA,776,ASYM	\$DA,770,ASYM	\$DA,782,ASYM
VATT,2,1,1			DA,785,ASYM	\$DA,788,ASYM	\$DA,791,ASYM
VSEL,s,volu,,238,240			DA,794,ASYM	\$DA,797,ASYM	\$DA,800,ASYM
VATT,2,1,1			DA,803,ASYM	\$DA,806,ASYM	\$DA,809,ASYM
VSEL,S,VOLU,,245,248			DA,812,ASYM	\$DA,815,ASYM	\$DA,818,ASYM
VATT,2,1,1			DA,821,ASYM	\$DA,824,ASYM	\$DA,754,ASYM
VSEL,s,volu,,132,135	!Propiedades del Acero		DA,827,ASYM	\$DA,830,ASYM	\$DA,833,ASYM
VATT,3,1,1			DA,836,ASYM	\$DA,839,ASYM	\$DA,842,ASYM
VSEL,s,volu,,142,165			DA,845,ASYM	\$DA,848,ASYM	\$DA,851,ASYM
VATT,3,1,1			DA,854,ASYM	\$DA,857,ASYM	\$DA,860,ASYM
VSEL,s,volu,,169,172			DA,863,ASYM	\$DA,866,ASYM	\$DA,869,ASYM
VATT,3,1,1			DA,872,ASYM	\$DA,875,ASYM	\$DA,877,ASYM
VSEL,S,VOLU,,177,180			DA,879,ASYM	\$DA,881,ASYM	\$DA,883,ASYM
VATT,3,1,1			DA,885,ASYM	\$DA,887,ASYM	\$DA,889,ASYM
VSEL,S,VOLU,,201,204			DA,679,ASYM	\$DA,656,ASYM	\$DA,634,ASYM
VATT,3,1,1			DA,632,ASYM	\$DA,628,ASYM	\$DA,626,ASYM
VSEL,s,volu,,193,196			DA,623,ASYM	\$DA,620,ASYM	\$DA,544,ASYM
VATT,3,1,1			DA,852,ASYM	\$DA,874,ASYM	\$DA,890,ASYM
VSEL,s,volu,,186,189			DA,753,ASYM	\$DA,737,ASYM	\$DA,715,ASYM
VATT,3,1,1			DA,780,ASYM	\$DA,802,ASYM	\$DA,825,ASYM
VSEL,s,volu,,210,213			!	= + MALLADO 2 + =	
VATT,3,1,1			FLST,5,126,6,ORDE,2		
VSEL,s,volu,,217,220			FITEM,5,127		
VATT,3,1,1			FITEM,5,-252		
VSEL,s,volu,,225,228			CM,_Y,VOLU		
VATT,3,1,1			VSEL,, , ,P51X		
VSEL,s,volu,,249,252			CM,_Y1,VOLU		
VATT,3,1,1			CHKMSH,'VOLU'		
VSEL,s,volu,,241,244			CMSEL,S,_Y		
VATT,3,1,1			!*		
VSEL,s,volu,,234,237			VMESH,_Y1		
VATT,3,1,1			!*		
ALLSEL,ALL			CMDELE,_Y		
!	+ = CONDICIONES DE FRONTERA DE LA SEGUNDA EXTRUSIÓN +		CMDELE,_Y1		
=			CMDELE,_Y2		
DA,509,ASYM	\$DA,514,ASYM	\$DA,518,ASYM	!*		
DA,522,ASYM	\$DA,526,ASYM	\$DA,530,ASYM	!	= + TERCERA EXTRUSIÓN + =	
DA,534,ASYM	\$DA,538,ASYM	\$DA,542,ASYM	FLST,2,126,5,ORDE,2		
DA,561,ASYM	\$DA,558,ASYM	\$DA,555,ASYM	FITEM,2,1		
DA,552,ASYM	\$DA,549,ASYM	\$DA,546,ASYM	FITEM,2,-126		
DA,579,ASYM	\$DA,576,ASYM	\$DA,573,ASYM	VEXT,P51X,,0,0,-0.133525,,,		

! * PROPIEDADES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN

VSEL,s,volu,,253,257 !Propiedades del Aire

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,262,267

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,292,294

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,299,302

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,307,311

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,316,318

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,323,326

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,331,335

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,340,342

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,347,350

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,355,359

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,364,366

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,371,374

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,258,261 !Propiedades del Acero

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,268,291

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,295,298

VATT,3,1,1

VSEL,S,VOLU,,303,306

VATT,3,1,1

VSEL,S,VOLU,,327,330

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,319,322

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,312,315

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,336,339

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,343,346

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,351,354

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,375,378

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,367,370

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,360,363

VATT,3,1,1

ALLSEL,ALL

! + = CONDICIONES DE FRONTERA DE LA TERCERA EXTRUSIÓN +

=

DA,1061,ASYM \$DA,1038,ASYM \$DA,1016,ASYM

DA,1014,ASYM \$DA,1010,ASYM \$DA,1008,ASYM

DA,1005,ASYM \$DA,1002,ASYM \$DA,926,ASYM

DA,1234,ASYM \$DA,1256,ASYM \$DA,1272,ASYM

DA,1135,ASYM \$DA,1119,ASYM \$DA,1097,ASYM

DA,1162,ASYM \$DA,1184,ASYM \$DA,1207,ASYM

! * Divisiones del 3er mallado *

LESIZE,1213,,,2,,,,,0

! = TERCER MALLADO =

FLST,5,126,6,ORDE,2

FITEM,5,253

FITEM,5,-378

CM,_Y,VOLU

VSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,VOLU

CHKMSH,"VOLU"

CMSEL,S,_Y

!*

VMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

! = + CUARTA EXTRUSIÓN + =

FLST,2,126,5,ORDE,126

FITEM,2,891

FITEM,2,896

FITEM,2,900

FITEM,2,904

FITEM,2,908

FITEM,2,912

FITEM,2,916

FITEM,2,920

FITEM,2,924

FITEM,2,928

FITEM,2,931

FITEM,2,934

FITEM,2,937

FITEM,2,940

FITEM,2,943

FITEM,2,946

FITEM,2,949

FITEM,2,952

FITEM,2,955

FITEM,2,958

FITEM,2,961

FITEM,2,964

FITEM,2,967

FITEM,2,970

FITEM,2,973

FITEM,2,976

FITEM,2,979

FITEM,2,982

FITEM,2,985

FITEM,2,988

FITEM,2,991

FITEM,2,994

FITEM,2,997

FITEM,2,1000

FITEM,2,1003

FITEM,2,1006

FITEM,2,1009

FITEM,2,1012

FITEM,2,1015

FITEM,2,1018

FITEM,2,1021

FITEM,2,1024

FITEM,2,1027

FITEM,2,1030	FITEM,2,1227
FITEM,2,1033	FITEM,2,1230
FITEM,2,1036	FITEM,2,1233
FITEM,2,1039	FITEM,2,1236
FITEM,2,1042	FITEM,2,1239
FITEM,2,1045	FITEM,2,1242
FITEM,2,1048	FITEM,2,1245
FITEM,2,1051	FITEM,2,1248
FITEM,2,1054	FITEM,2,1251
FITEM,2,1057	FITEM,2,1254
FITEM,2,1060	FITEM,2,1257
FITEM,2,1063	FITEM,2,1259
FITEM,2,1067	FITEM,2,1261
FITEM,2,1071	FITEM,2,1263
FITEM,2,1075	FITEM,2,1265
FITEM,2,1079	FITEM,2,1267
FITEM,2,1083	FITEM,2,1269
FITEM,2,1087	FITEM,2,1271
FITEM,2,1091	VEXT,P51X, , ,0,0,-0.003,,,
FITEM,2,1095	
FITEM,2,1099	! * PROPIEDADES DE LA 4ta. EXTRUSIÓN
FITEM,2,1102	VSEL,s,volu,,379,383 !Propiedades del Aire
FITEM,2,1105	VATT,2,1,1
FITEM,2,1108	VSEL,S,VOLU,,388,393
FITEM,2,1111	VATT,2,1,1
FITEM,2,1114	VSEL,S,VOLU,,418,420
FITEM,2,1117	VATT,2,1,1
FITEM,2,1120	VSEL,s,volu,,425,428
FITEM,2,1122	VATT,2,1,1
FITEM,2,1124	VSEL,s,volu,,433,437
FITEM,2,1126	VATT,2,1,1
FITEM,2,1128	VSEL,s,volu,,442,444
FITEM,2,1130	VATT,2,1,1
FITEM,2,1132	VSEL,s,volu,,449,452
FITEM,2,1134	VATT,2,1,1
FITEM,2,1136	VSEL,s,volu,,457,461
FITEM,2,1140	VATT,2,1,1
FITEM,2,1143	VSEL,s,volu,,466,468
FITEM,2,1146	VATT,2,1,1
FITEM,2,1149	VSEL,s,volu,,473,476
FITEM,2,1152	VATT,2,1,1
FITEM,2,1155	VSEL,s,volu,,481,485
FITEM,2,1158	VATT,2,1,1
FITEM,2,1161	VSEL,s,volu,,490,492
FITEM,2,1164	VATT,2,1,1
FITEM,2,1167	VSEL,S,VOLU,,497,500
FITEM,2,1170	VATT,2,1,1
FITEM,2,1173	VSEL,S,VOLU,,399
FITEM,2,1176	VATT,2,1,1
FITEM,2,1179	VSEL,S,VOLU,,404
FITEM,2,1182	VATT,2,1,1
FITEM,2,1185	VSEL,S,VOLU,,397
FITEM,2,1188	VATT,2,1,1
FITEM,2,1191	VSEL,S,VOLU,,402
FITEM,2,1194	VATT,2,1,1
FITEM,2,1197	VSEL,S,VOLU,,395
FITEM,2,1200	VATT,2,1,1
FITEM,2,1203	VSEL,S,VOLU,,400
FITEM,2,1206	VATT,2,1,1
FITEM,2,1209	VSEL,s,volu,,384,387 !Propiedades del Acero
FITEM,2,1212	VATT,3,1,1
FITEM,2,1215	VSEL,s,volu,,412,417
FITEM,2,1218	VATT,3,1,1
FITEM,2,1221	VSEL,s,volu,,406,411
FITEM,2,1224	VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,401			FITEM,2,1282
VATT,3,1,1			FITEM,2,1286
VSEL,s,volu,,403			FITEM,2,1290
VATT,3,1,1			FITEM,2,1294
VSEL,s,volu,,405			FITEM,2,1298
VATT,3,1,1			FITEM,2,1302
VSEL,s,volu,,394			FITEM,2,1306
VATT,3,1,1			FITEM,2,1310
VSEL,s,volu,,396			FITEM,2,1313
VATT,3,1,1			FITEM,2,1316
VSEL,s,volu,,398			FITEM,2,1319
VATT,3,1,1			FITEM,2,1322
VSEL,s,volu,,421,424			FITEM,2,1325
VATT,3,1,1			FITEM,2,1328
VSEL,s,volu,,429,432			FITEM,2,1331
VATT,3,1,1			FITEM,2,1334
VSEL,s,volu,,453,456			FITEM,2,1337
VATT,3,1,1			FITEM,2,1340
VSEL,s,volu,,445,448			FITEM,2,1343
VATT,3,1,1			FITEM,2,1346
VSEL,s,volu,,438,441			FITEM,2,1349
VATT,3,1,1			FITEM,2,1352
VSEL,s,volu,,462,465			FITEM,2,1355
VATT,3,1,1			FITEM,2,1358
VSEL,s,volu,,469,472			FITEM,2,1361
VATT,3,1,1			FITEM,2,1364
VSEL,s,volu,,477,480			FITEM,2,1367
VATT,3,1,1			FITEM,2,1370
VSEL,s,volu,,501,504			FITEM,2,1373
VATT,3,1,1			FITEM,2,1376
VSEL,s,volu,,493,496			FITEM,2,1379
VATT,3,1,1			FITEM,2,1382
VSEL,s,volu,,486,489			FITEM,2,1385
VATT,3,1,1			FITEM,2,1388
ALLSEL,ALL			FITEM,2,1391
!	+ = CONDICIONES DE FRONTERA DE LA CUARTA EXTRUSIÓN + =		FITEM,2,1394
DA,1443,ASYM	\$DA,1420,ASYM	\$DA,1398,ASYM	FITEM,2,1397
DA,1396,ASYM	\$DA,1392,ASYM	\$DA,1390,ASYM	FITEM,2,1400
DA,1387,ASYM	\$DA,1384,ASYM	\$DA,1308,ASYM	FITEM,2,1403
DA,1616,ASYM	\$DA,1638,ASYM	\$DA,1654,ASYM	FITEM,2,1406
DA,1517,ASYM	\$DA,1501,ASYM	\$DA,1479,ASYM	FITEM,2,1409
DA,1544,ASYM	\$DA,1566,ASYM	\$DA,1589,ASYM	FITEM,2,1412
!	+ = CUARTO MALLADO = +		FITEM,2,1415
FLST,5,126,6,ORDE,2			FITEM,2,1418
FITEM,5,379			FITEM,2,1421
FITEM,5,-504			FITEM,2,1424
CM,_Y,VOLU			FITEM,2,1427
VSEL, , , ,P51X			FITEM,2,1430
CM,_Y1,VOLU			FITEM,2,1433
CHKMSH,'VOLU'			FITEM,2,1436
CMSEL,S,_Y			FITEM,2,1439
!* VMESH,_Y1			FITEM,2,1442
!* CMDELE,_Y			FITEM,2,1445
CMDELE,_Y1			FITEM,2,1449
CMDELE,_Y2			FITEM,2,1453
!* ! = + QUINTA EXTRUSIÓN + =			FITEM,2,1457
FLST,2,126,5,ORDE,126			FITEM,2,1461
FITEM,2,1273			FITEM,2,1465
FITEM,2,1278			FITEM,2,1469
			FITEM,2,1473
			FITEM,2,1477
			FITEM,2,1481
			FITEM,2,1484
			FITEM,2,1487
			FITEM,2,1490

FITEM,2,1493	VATT,2,1,1
FITEM,2,1496	VSEL,S,VOLU,,544,546
FITEM,2,1499	VATT,2,1,1
FITEM,2,1502	VSEL,s,volu,,551,554
FITEM,2,1504	VATT,2,1,1
FITEM,2,1506	VSEL,s,volu,,559,563
FITEM,2,1508	VATT,2,1,1
FITEM,2,1510	VSEL,s,volu,,568,570
FITEM,2,1512	VATT,2,1,1
FITEM,2,1514	VSEL,s,volu,,575,578
FITEM,2,1516	VATT,2,1,1
FITEM,2,1518	VSEL,s,volu,,583,587
FITEM,2,1522	VATT,2,1,1
FITEM,2,1525	VSEL,s,volu,,592,594
FITEM,2,1528	VATT,2,1,1
FITEM,2,1531	VSEL,s,volu,,599,602
FITEM,2,1534	VATT,2,1,1
FITEM,2,1537	VSEL,s,volu,,607,611
FITEM,2,1540	VATT,2,1,1
FITEM,2,1543	VSEL,S,VOLU,,616,618
FITEM,2,1546	VATT,2,1,1
FITEM,2,1549	VSEL,S,VOLU,,623,626
FITEM,2,1552	VATT,2,1,1
FITEM,2,1555	VSEL,S,VOLU,,531
FITEM,2,1558	VATT,2,1,1
FITEM,2,1561	VSEL,S,VOLU,,524
FITEM,2,1564	VATT,2,1,1
FITEM,2,1567	VSEL,S,VOLU,,529
FITEM,2,1570	VATT,2,1,1
FITEM,2,1573	VSEL,S,VOLU,,522
FITEM,2,1576	VATT,2,1,1
FITEM,2,1579	VSEL,S,VOLU,,527
FITEM,2,1582	VATT,2,1,1
FITEM,2,1585	VSEL,S,VOLU,,520
FITEM,2,1588	VATT,2,1,1
FITEM,2,1591	VSEL,s,volu,,510,513
FITEM,2,1594	VATT,3,1,1
FITEM,2,1597	VSEL,s,volu,,537,543
FITEM,2,1600	VATT,3,1,1
FITEM,2,1603	VSEL,s,volu,,532,536
FITEM,2,1606	VATT,3,1,1
FITEM,2,1609	VSEL,S,VOLU,,526
FITEM,2,1612	VATT,3,1,1
FITEM,2,1615	VSEL,s,volu,,528
FITEM,2,1618	VATT,3,1,1
FITEM,2,1621	VSEL,s,volu,,530
FITEM,2,1624	VATT,3,1,1
FITEM,2,1627	VSEL,s,volu,,521
FITEM,2,1630	VATT,3,1,1
FITEM,2,1633	VSEL,s,volu,,523
FITEM,2,1636	VATT,3,1,1
FITEM,2,1639	VSEL,s,volu,,525
FITEM,2,1641	VATT,3,1,1
FITEM,2,1643	VSEL,s,volu,,547,550
FITEM,2,1645	VATT,3,1,1
FITEM,2,1647	VSEL,s,volu,,555,558
FITEM,2,1649	VATT,3,1,1
FITEM,2,1651	VSEL,s,volu,,579,582
FITEM,2,1653	VATT,3,1,1
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.003,,,	VSEL,s,volu,,571,574
	VATT,3,1,1
! * PROPIEDADES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN	VSEL,s,volu,,564,567
VSEL,s,volu,,505,509	VATT,3,1,1
VATT,2,1,1	VSEL,s,volu,,588,591
VSEL,S,VOLU,,514,519	VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,595,598			FITEM,2,1743
VATT,3,1,1			FITEM,2,1746
VSEL,s,volu,,603,606			FITEM,2,1749
VATT,3,1,1			FITEM,2,1752
VSEL,s,volu,,627,630			FITEM,2,1755
VATT,3,1,1			FITEM,2,1758
VSEL,s,volu,,619,622			FITEM,2,1761
VATT,3,1,1			FITEM,2,1764
VSEL,s,volu,,612,615			FITEM,2,1767
VATT,3,1,1			FITEM,2,1770
ALLSEL,ALL			FITEM,2,1773
			FITEM,2,1776
!	+ = CONDICIONES DE FRONTERA DE LA QUINTA EXTRUSIÓN + =		FITEM,2,1779
DA,1825,ASYM	\$DA,1802,ASYM	\$DA,1780,ASYM	FITEM,2,1782
DA,1778,ASYM	\$DA,1774,ASYM	\$DA,1772,ASYM	FITEM,2,1785
DA,1769,ASYM	\$DA,1766,ASYM	\$DA,1690,ASYM	FITEM,2,1788
DA,1998,ASYM	\$DA,2020,ASYM	\$DA,2036,ASYM	FITEM,2,1791
DA,1899,ASYM	\$DA,1883,ASYM	\$DA,1861,ASYM	FITEM,2,1794
DA,1926,ASYM	\$DA,1948,ASYM	\$DA,1971,ASYM	FITEM,2,1797
			FITEM,2,1800
!	+ = QUINTO MALLADO = +		FITEM,2,1803
FLST,5,126,6,ORDE,2			FITEM,2,1806
FITEM,5,505			FITEM,2,1809
FITEM,5,-630			FITEM,2,1812
CM,_Y,VOLU			FITEM,2,1815
VSEL,, , ,P51X			FITEM,2,1818
CM,_Y1,VOLU			FITEM,2,1821
CHKMSH,'VOLU'			FITEM,2,1824
CMSEL,S,_Y			FITEM,2,1827
!* VMESH,_Y1			FITEM,2,1831
!* CMDELE,_Y			FITEM,2,1835
CMDELE,_Y1			FITEM,2,1839
CMDELE,_Y2			FITEM,2,1843
!* FITEM,2,1847			FITEM,2,1851
			FITEM,2,1855
			FITEM,2,1859
!	+ = SEXTA EXTRUSIÓN = +		FITEM,2,1863
FLST,2,126,5,ORDE,126			FITEM,2,1866
FITEM,2,1655			FITEM,2,1869
FITEM,2,1660			FITEM,2,1872
FITEM,2,1664			FITEM,2,1875
FITEM,2,1668			FITEM,2,1878
FITEM,2,1672			FITEM,2,1881
FITEM,2,1676			FITEM,2,1884
FITEM,2,1680			FITEM,2,1886
FITEM,2,1684			FITEM,2,1888
FITEM,2,1688			FITEM,2,1890
FITEM,2,1692			FITEM,2,1892
FITEM,2,1695			FITEM,2,1894
FITEM,2,1698			FITEM,2,1896
FITEM,2,1701			FITEM,2,1898
FITEM,2,1704			FITEM,2,1900
FITEM,2,1707			FITEM,2,1904
FITEM,2,1710			FITEM,2,1907
FITEM,2,1713			FITEM,2,1910
FITEM,2,1716			FITEM,2,1913
FITEM,2,1719			FITEM,2,1916
FITEM,2,1722			FITEM,2,1919
FITEM,2,1725			FITEM,2,1922
FITEM,2,1728			FITEM,2,1925
FITEM,2,1731			FITEM,2,1928
FITEM,2,1734			FITEM,2,1931
FITEM,2,1737			FITEM,2,1934
FITEM,2,1740			FITEM,2,1937

FITEM,2,1940	VATT,3,1,1
FITEM,2,1943	VSEL,s,volu,,646,669
FITEM,2,1946	VATT,3,1,1
FITEM,2,1949	VSEL,s,volu,,673,676
FITEM,2,1952	VATT,3,1,1
FITEM,2,1955	VSEL,S,VOLU,,681,684
FITEM,2,1958	VATT,3,1,1
FITEM,2,1961	VSEL,S,VOLU,,705,708
FITEM,2,1964	VATT,3,1,1
FITEM,2,1967	VSEL,s,volu,,697,700
FITEM,2,1970	VATT,3,1,1
FITEM,2,1973	VSEL,s,volu,,690,693
FITEM,2,1976	VATT,3,1,1
FITEM,2,1979	VSEL,s,volu,,714,717
FITEM,2,1982	VATT,3,1,1
FITEM,2,1985	VSEL,s,volu,,721,724
FITEM,2,1988	VATT,3,1,1
FITEM,2,1991	VSEL,s,volu,,729,732
FITEM,2,1994	VATT,3,1,1
FITEM,2,1997	VSEL,s,volu,,753,756
FITEM,2,2000	VATT,3,1,1
FITEM,2,2003	VSEL,s,volu,,745,748
FITEM,2,2006	VATT,3,1,1
FITEM,2,2009	VSEL,s,volu,,738,741
FITEM,2,2012	VATT,3,1,1
FITEM,2,2015	ALLSEL,ALL
FITEM,2,2018	
FITEM,2,2021	! + = CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 6ta. EXTRUSIÓN = +
FITEM,2,2023	DA,2213,ASYM \$DA,2217,ASYM \$DA,2221,ASYM
FITEM,2,2025	DA,2225,ASYM \$DA,2229,ASYM \$DA,2233,ASYM
FITEM,2,2027	DA,2237,ASYM \$DA,2241,ASYM \$DA,2245,ASYM
FITEM,2,2029	DA,2248,ASYM \$DA,2251,ASYM \$DA,2254,ASYM
FITEM,2,2031	DA,2257,ASYM \$DA,2260,ASYM \$DA,2263,ASYM
FITEM,2,2033	DA,2266,ASYM \$DA,2268,ASYM \$DA,2270,ASYM
FITEM,2,2035	DA,2272,ASYM \$DA,2274,ASYM \$DA,2276,ASYM
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.760475,,,	DA,2278,ASYM \$DA,2280,ASYM \$DA,2209,ASYM
	DA,2037,ASYM \$DA,2042,ASYM \$DA,2046,ASYM
! * PROPIEDADES DE LA 6ta. EXTRUSIÓN	DA,2050,ASYM \$DA,2054,ASYM \$DA,2058,ASYM
VSEL,s,volu,,631,635 !Propiedades del Aire	DA,2062,ASYM \$DA,2066,ASYM \$DA,2070,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2089,ASYM \$DA,2086,ASYM \$DA,2083,ASYM
VSEL,S,VOLU,,640,645	DA,2080,ASYM \$DA,2077,ASYM \$DA,2074,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2107,ASYM \$DA,2104,ASYM \$DA,2101,ASYM
VSEL,S,VOLU,,670,672	DA,2098,ASYM \$DA,2095,ASYM \$DA,2092,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2125,ASYM \$DA,2122,ASYM \$DA,2119,ASYM
VSEL,s,volu,,677,680	DA,2116,ASYM \$DA,2113,ASYM \$DA,2110,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2143,ASYM \$DA,2140,ASYM \$DA,2137,ASYM
VSEL,s,volu,,685,689	DA,2134,ASYM \$DA,2131,ASYM \$DA,2128,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2161,ASYM \$DA,2158,ASYM \$DA,2155,ASYM
VSEL,s,volu,,694,696	DA,2152,ASYM \$DA,2149,ASYM \$DA,2146,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2164,ASYM \$DA,2167,ASYM \$DA,2170,ASYM
VSEL,s,volu,,701,704	DA,2173,ASYM \$DA,2176,ASYM \$DA,2179,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2182,ASYM \$DA,2185,ASYM \$DA,2188,ASYM
VSEL,s,volu,,709,713	DA,2191,ASYM \$DA,2194,ASYM \$DA,2197,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2200,ASYM \$DA,2203,ASYM \$DA,2206,ASYM
VSEL,s,volu,,718,720	DA,2355,ASYM \$DA,2358,ASYM \$DA,2361,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2364,ASYM \$DA,2367,ASYM \$DA,2370,ASYM
VSEL,s,volu,,725,728	DA,2373,ASYM \$DA,2376,ASYM \$DA,2379,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2382,ASYM \$DA,2385,ASYM \$DA,2388,ASYM
VSEL,s,volu,,733,737	DA,2391,ASYM \$DA,2394,ASYM \$DA,2397,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2400,ASYM \$DA,2403,ASYM \$DA,2405,ASYM
VSEL,s,volu,,742,744	DA,2407,ASYM \$DA,2409,ASYM \$DA,2411,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2413,ASYM \$DA,2415,ASYM \$DA,2417,ASYM
VSEL,S,VOLU,,749,752	DA,2282,ASYM \$DA,2286,ASYM \$DA,2289,ASYM
VATT,2,1,1	DA,2292,ASYM \$DA,2295,ASYM \$DA,2298,ASYM
VSEL,s,volu,,636,639 !Propiedades del Acero	DA,2301,ASYM \$DA,2304,ASYM \$DA,2307,ASYM

DA,2310,ASYM	\$DA,2313,ASYM	\$DA,2316,ASYM
DA,2319,ASYM	\$DA,2322,ASYM	\$DA,2325,ASYM
DA,2328,ASYM	\$DA,2331,ASYM	\$DA,2334,ASYM
DA,2337,ASYM	\$DA,2340,ASYM	\$DA,2343,ASYM
DA,2346,ASYM	\$DA,2349,ASYM	\$DA,2352,ASYM
DA,2207,ASYM	\$DA,2184,ASYM	\$DA,2162,ASYM
DA,2160,ASYM	\$DA,2156,ASYM	\$DA,2154,ASYM
DA,2151,ASYM	\$DA,2148,ASYM	\$DA,2072,ASYM
DA,2380,ASYM	\$DA,2402,ASYM	\$DA,2418,ASYM
DA,2281,ASYM	\$DA,2265,ASYM	\$DA,2243,ASYM
DA,2308,ASYM	\$DA,2330,ASYM	\$DA,2353,ASYM

! * Divisiones del 6to. mallado *
 LESIZE,2374,,,12,,,,,0

! = + SEXTO MALLADO + =
 FLST,5,126,6,ORDE,2
 FITEM,5,631
 FITEM,5,-756
 CM,_Y,VOLU
 VSEL, , , ,P51X
 CM,_Y1,VOLU
 CHKMSH,'VOLU'
 CMSEL,S,_Y
 !*
 VMESH,_Y1
 !*
 CMDELE,_Y
 CMDELE,_Y1
 CMDELE,_Y2
 !*

CÓDIGO DE UNA FUGA A 45°

/PREP7
 /Titulo, 3-D Análisis de tubería "CONDICION DE FUGA 45°"
 ET,1,SOLID97 !Define el tipo de elemento
 /units,si !Selección de unidades
 MP,MURX,1,1.2 !Permeabilidad del imán en X
 MP,MURY,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Y
 MP,MURZ,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Z
 MP,MGY,1,868000 !Magnetización del imán
 MP,MURX,2,1 !Permeabilidad del aire
 MP,MURX,3,2000 !Permeabilidad del acero

! * DIMENSIONES DEL IMÁN *

BLC4,0,0,0.0127,0.101855
 BLC4,-0.0127,0,0.0127,0.101855
 BLC4,-0.0127,-0.101855,0.0127,0.101855
 BLC4,0,-0.101855,0.0127,0.101855

! * DIMENSIÓN RADIAL DEL TUBO *

CYL4,0,0,0, ,0.1026437091
 CYL4,0,0,0, ,0.12233274182
 CYL4,0,0,0, ,0.127255
 CYL4,0,0,0, ,0.129109
 CYL4,0,0,0, ,0.136525
 ADELE,all
 csys,1
 K, ,0.136525,224.55,
 K, ,0.07,45,
 K, ,0.136525,225.45,
 K, ,0.07,135,
 K, ,0.07,225,
 K, ,0.07,315,
 K, ,0.136525,135,
 K, ,0.136525,225,
 K, ,0.136525,315,
 K, ,0.136525,44.55,
 K, ,0.136525,45,
 K, ,0.136525,45.45,
 csys,0
 K, ,0.0127,0.136525,
 K, ,0.0127,0.136525,
 K, ,0.0127,-0.136525,
 K, ,0.0127,-0.136525,
 LSTR,34,36
 LSTR,35,33
 LOVLAP,all
 LSTR,46,39
 LSTR,48,37
 FLST,2,5,4,ORDE,5
 FITEM,2,5
 FITEM,2,-6
 FITEM,2,25
 FITEM,2,29
 FITEM,2,33
 LOVLAP,P51X
 LDELE,15,0
 LDELE,16,0
 KDELE,37
 KDELE,39
 LSTR,49,3
 LSTR,50,8
 LSTR,51,14
 LSTR,52,9
 LSTR,47,38
 LSTR,43,40

LSTR,44,41
 LSTR,45,42
 LOVLAP,all
 LSTR,38,40
 LSTR,38,42
 LSTR,41,40
 LSTR,41,42
 LSTR,7,37
 LSTR,6,37
 LDELE,136,0
 LDELE,137,0
 LDELE,138,0
 LDELE,139,0
 KDELE,49
 KDELE,50
 KDELE,51
 KDELE,52
 LOVLAP,all

! * Generar áreas *

AL,1,16,17,136	\$AL,23,16,36,35	\$AL,36,33,100,118
AL,57,100,79,156	\$AL,61,79,7,15	\$AL,65,7,11,20
AL,69,11,13,18	\$AL,15,157,75	\$AL,14,157,77
AL,75,20,158,78	\$AL,77,37,158,130	\$AL,78,18,134,132
AL,130,19,134,133	\$AL,35,24,118,88	\$AL,88,84,156,150
AL,14,150,76,140	\$AL,37,76,128,154	\$AL,19,128,135,155
AL,136,25,24,3	\$AL,3,44,46	\$AL,44,58,84,96
AL,96,62,140,82	\$AL,82,66,154,91v	\$AL,91,70,155,108
AL,39,27,17,74	\$AL,26,43,27,38	\$AL,34,101,43,119
AL,59,101,114,164	\$AL,63,114,85,163	\$AL,67,85,98,162
AL,71,98,112,122	\$AL,38,119,29,102	\$AL,164,102,151,93
AL,163,151,159,147	\$AL,162,159,165,148	\$AL,122,165,125,149
AL,74,29,25,45	\$AL,45,46,49	\$AL,49,93,58,97
AL,97,147,62,83	\$AL,83,148,66,92	\$AL,92,149,70,111
AL,39,21,28,137	\$AL,26,28,50,51	\$AL,34,50,103,120
AL,59,103,115,170	\$AL,63,115,86,169	\$AL,67,86,99,168
AL,71,99,113,126	\$AL,51,120,30,104	\$AL,170,104,152,95
AL,169,152,160,146	\$AL,168,160,166,145	\$AL,126,166,127,144
AL,137,30,31,9	\$AL,9,54,52	\$AL,52,60,95,109
AL,109,146,64,89	\$AL,89,145,68,123	\$AL,123,144,72,116
AL,1,21,22,138	\$AL,22,23,73,55	\$AL,55,33,121,106
AL,57,106,80,171	\$AL,61,80,81,172	\$AL,65,81,90,173
AL,69,90,107,131	\$AL,73,121,32,105	\$AL,171,105,153,94
AL,172,153,161,143	\$AL,173,161,167,142	\$AL,131,167,129,141
AL,138,31,32,53	\$AL,53,54,56	\$AL,56,60,94,110
AL,110,64,143,87	\$AL,87,68,142,124	\$AL,124,72,141,117

! == PRIMERA EXTRUSIÓN ==

FLST,2,78,5,ORDE,2
 FITEM,2,1
 FITEM,2,-78
 VEXT,P51X, , ,0,0.0254,.,.,

! * PROPIEDADES DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *

VSEL,S,VOLU,,1 !Propiedades del Imán
 VATT,1,1,1
 VSEL,S,VOLU,,19
 VATT,1,1,1
 VSEL,s,volu,,25
 VATT,1,1,1
 VSEL,s,volu,,37
 VATT,1,1,1
 VSEL,s,volu,,61
 VATT,1,1,1
 VSEL,s,volu,,73

VATT,1,1,1		DA,316,ASYM	\$DA,213,ASYM	\$DA,201,ASYM
VSEL,s,volu,,43		DA,185,ASYM	\$DA,234,ASYM	\$DA,250,ASYM
VATT,1,1,1		DA,267,ASYM	\$DA,19,ASYM	\$DA,37,ASYM
VSEL,s,volu,,55		DA,1,ASYM	\$DA,25,ASYM	\$DA,61,ASYM
VATT,1,1,1		DA,43,ASYM	\$DA,73,ASYM	\$DA,55,ASYM
VSEL,s,volu,,2,5	!Propiedades del Aire			
VATT,2,1,1		!	* Divisiones del 1er mallado *	
VSEL,S,VOLU,,8,9		LESIZE,195,,,11,,,,,0	\$LESIZE,229,,,11,,,,,0	\$LESIZE,298,,,11,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,281,,,11,,,,,0	\$LESIZE,326,,,11,,,,,0	\$LESIZE,342,,,11,,,,,0
VSEL,S,VOLU,,14,16		LESIZE,396,,,11,,,,,0	\$LESIZE,380,,,11,,,,,0	\$LESIZE,194,,,3,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,189,,,2,,,,,0	\$LESIZE,184,,,4,,,,,0	\$LESIZE,179,,,16,,,,,0
VSEL,s,volu,,20,22		LESIZE,305,,,4,,,,,0	\$LESIZE,247,,,4,,,,,0	\$LESIZE,249,,,4,,,,,0
VATT,2,1,1				
VSEL,s,volu,,38,40		!	* MALLADO 1 *	
VATT,2,1,1		VMESH,ALL		
VSEL,s,volu,,26,29				
VATT,2,1,1		!	+ SEGUNDA EXTRUSIÓN +=	
VSEL,s,volu,,32,34		FLST,2,78,5,ORDE,78		
VATT,2,1,1		FITEM,2,79		
VSEL,s,volu,,44,47		FITEM,2,84		
VATT,2,1,1		FITEM,2,88		
VSEL,s,volu,,50,52		FITEM,2,92		
VATT,2,1,1		FITEM,2,96		
VSEL,s,volu,,56,58		FITEM,2,100		
VATT,2,1,1		FITEM,2,104		
VSEL,s,volu,,74,76		FITEM,2,108		
VATT,2,1,1		FITEM,2,111		
VSEL,s,volu,,62,65		FITEM,2,114		
VATT,2,1,1		FITEM,2,117		
VSEL,S,VOLU,,68,70		FITEM,2,120		
VATT,2,1,1		FITEM,2,123		
VSEL,s,volu,,6,7	!Propiedades del Acero	FITEM,2,126		
VATT,3,1,1		FITEM,2,129		
VSEL,s,volu,,10,13		FITEM,2,132		
VATT,3,1,1		FITEM,2,135		
VSEL,s,volu,,17,18		FITEM,2,138		
VATT,3,1,1		FITEM,2,141		
VSEL,S,VOLU,,23,24		FITEM,2,144		
VATT,3,1,1		FITEM,2,147		
VSEL,S,VOLU,,41,42		FITEM,2,150		
VATT,3,1,1		FITEM,2,153		
VSEL,s,volu,,35,36		FITEM,2,156		
VATT,3,1,1		FITEM,2,159		
VSEL,s,volu,,30,31		FITEM,2,163		
VATT,3,1,1		FITEM,2,167		
VSEL,s,volu,,48,49		FITEM,2,171		
VATT,3,1,1		FITEM,2,175		
VSEL,s,volu,,53,54		FITEM,2,179		
VATT,3,1,1		FITEM,2,183		
VSEL,s,volu,,59,60		FITEM,2,187		
VATT,3,1,1		FITEM,2,190		
VSEL,s,volu,,77,78		FITEM,2,193		
VATT,3,1,1		FITEM,2,196		
VSEL,s,volu,,71,72		FITEM,2,199		
VATT,3,1,1		FITEM,2,202		
VSEL,s,volu,,66,67		FITEM,2,204		
VATT,3,1,1		FITEM,2,206		
ALLSEL,ALL		FITEM,2,208		
!	* CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *	FITEM,2,210		
DA,202,ASYM	\$DA,141,ASYM	\$DA,79,ASYM	FITEM,2,212	
DA,159,ASYM	\$DA,269,ASYM	\$DA,214,ASYM	FITEM,2,214	
DA,305,ASYM	\$DA,251,ASYM	\$DA,157,ASYM	FITEM,2,218	
DA,139,ASYM	\$DA,124,ASYM	\$DA,122,ASYM	FITEM,2,221	
DA,106,ASYM	\$DA,288,ASYM	\$DA,304,ASYM	FITEM,2,224	
			FITEM,2,227	

FITEM,2,230	VATT,3,1,1
FITEM,2,233	VSEL,S,VOLU,,101,102
FITEM,2,236	VATT,3,1,1
FITEM,2,239	VSEL,S,VOLU,,119,120
FITEM,2,242	VATT,3,1,1
FITEM,2,245	VSEL,s,volu,,113,114
FITEM,2,248	VATT,3,1,1
FITEM,2,251	VSEL,s,volu,,108,109
FITEM,2,254	VATT,3,1,1
FITEM,2,257	VSEL,s,volu,,126,127
FITEM,2,260	VATT,3,1,1
FITEM,2,263	VSEL,s,volu,,131,132
FITEM,2,266	VATT,3,1,1
FITEM,2,269	VSEL,s,volu,,137,138
FITEM,2,272	VATT,3,1,1
FITEM,2,275	VSEL,s,volu,,155,156
FITEM,2,278	VATT,3,1,1
FITEM,2,281	VSEL,s,volu,,149,150
FITEM,2,284	VATT,3,1,1
FITEM,2,287	VSEL,s,volu,,144,145
FITEM,2,290	VATT,3,1,1
FITEM,2,293	ALLSEL,ALL
FITEM,2,296	
FITEM,2,299	! * CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 2da. EXTRUSIÓN *
FITEM,2,302	DA,317,ASYM \$DA,322,ASYM \$DA,326,ASYM
FITEM,2,305	DA,330,ASYM \$DA,334,ASYM \$DA,338,ASYM
FITEM,2,307	DA,342,ASYM \$DA,346,ASYM \$DA,349,ASYM
FITEM,2,309	DA,352,ASYM \$DA,355,ASYM \$DA,358,ASYM
FITEM,2,311	DA,361,ASYM \$DA,364,ASYM \$DA,367,ASYM
FITEM,2,313	DA,370,ASYM \$DA,373,ASYM \$DA,376,ASYM
FITEM,2,315	DA,379,ASYM \$DA,382,ASYM \$DA,385,ASYM
VEXT,P51X, , ,0,0,0.9,,,	DA,388,ASYM \$DA,391,ASYM \$DA,394,ASYM
	DA,397,ASYM \$DA,401,ASYM \$DA,405,ASYM
! * PROPIEDADES DE LA 2da. EXTRUSIÓN	DA,409,ASYM \$DA,413,ASYM \$DA,417,ASYM
VSEL,s,volu,,79,83 !Propiedades del Aire	DA,421,ASYM \$DA,425,ASYM \$DA,428,ASYM
VATT,2,1,1	DA,431,ASYM \$DA,434,ASYM \$DA,437,ASYM
VSEL,S,VOLU,,86,87	DA,440,ASYM \$DA,442,ASYM \$DA,444,ASYM
VATT,2,1,1	DA,446,ASYM \$DA,448,ASYM \$DA,450,ASYM
VSEL,S,VOLU,,92,94	DA,452,ASYM \$DA,456,ASYM \$DA,459,ASYM
VATT,2,1,1	DA,462,ASYM \$DA,465,ASYM \$DA,468,ASYM
VSEL,s,volu,,97,100	DA,471,ASYM \$DA,474,ASYM \$DA,477,ASYM
VATT,2,1,1	DA,480,ASYM \$DA,483,ASYM \$DA,486,ASYM
VSEL,s,volu,,103,107	DA,489,ASYM \$DA,492,ASYM \$DA,495,ASYM
VATT,2,1,1	DA,498,ASYM \$DA,501,ASYM \$DA,504,ASYM
VSEL,s,volu,,110,112	DA,507,ASYM \$DA,510,ASYM \$DA,513,ASYM
VATT,2,1,1	DA,516,ASYM \$DA,519,ASYM \$DA,522,ASYM
VSEL,s,volu,,115,118	DA,525,ASYM \$DA,528,ASYM \$DA,531,ASYM
VATT,2,1,1	DA,534,ASYM \$DA,537,ASYM \$DA,540,ASYM
VSEL,s,volu,,121,125	DA,543,ASYM \$DA,545,ASYM \$DA,547,ASYM
VATT,2,1,1	DA,549,ASYM \$DA,551,ASYM \$DA,553,ASYM
VSEL,s,volu,,128,130	DA,395,ASYM \$DA,377,ASYM \$DA,362,ASYM
VATT,2,1,1	DA,360,ASYM \$DA,344,ASYM \$DA,526,ASYM
VSEL,s,volu,,133,136	DA,542,ASYM \$DA,554,ASYM \$DA,451,ASYM
VATT,2,1,1	DA,439,ASYM \$DA,423,ASYM \$DA,472,ASYM
VSEL,s,volu,,139,143	DA,488,ASYM \$DA,505,ASYM
VATT,2,1,1	
VSEL,s,volu,,146,148	! *+ SEGUNDO MALLADO +*
VATT,2,1,1	FLST,5,78,6,ORDE,2
VSEL,S,VOLU,,151,154	FITEM,5,79
VATT,2,1,1	FITEM,5,-156
VSEL,s,volu,,84,85 !Propiedades del Acero	CM,_Y,VOLU
VATT,3,1,1	VSEL, , , ,P51X
VSEL,s,volu,,88,91	CM,_Y1,VOLU
VATT,3,1,1	CHKMSH,'VOLU'
VSEL,s,volu,,95,96	CMSEL,S,_Y

```

!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          += TERCERA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-78
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.134525,,,

!          * PROPIEDADES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN
VSEL,s,volu,,157,161      !Propiedades del Aire
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,164,165
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,170,172
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,175,178
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,181,185
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,188,190
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,193,196
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,199,203
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,206,208
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,211,214
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,217,221
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,224,226
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,229,232
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,162,163      !Propiedades del Acero
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,166,169
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,173,174
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,179,180
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,197,198
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,191,192
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,186,187
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,204,205
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,209,210
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,215,216
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,233,234
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,227,228
VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,222,223
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

!          *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *+
DA,633,ASYM      $DA,615,ASYM      $DA,600,ASYM
DA,598,ASYM      $DA,582,ASYM      $DA,764,ASYM
DA,780,ASYM      $DA,792,ASYM      $DA,689,ASYM
DA,677,ASYM      $DA,661,ASYM      $DA,710,ASYM
DA,726,ASYM      $DA,743,ASYM

!          *+ DIVISIONES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *+
LESIZE,735,,,2,,,,,0

!          += TERCER MALLADO +=
FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,157
FITEM,5,-234
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          += CUARTA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,78
FITEM,2,555
FITEM,2,560
FITEM,2,564
FITEM,2,568
FITEM,2,572
FITEM,2,576
FITEM,2,580
FITEM,2,584
FITEM,2,587
FITEM,2,590
FITEM,2,593
FITEM,2,596
FITEM,2,599
FITEM,2,602
FITEM,2,605
FITEM,2,608
FITEM,2,611
FITEM,2,614
FITEM,2,617
FITEM,2,620
FITEM,2,623
FITEM,2,626
FITEM,2,629
FITEM,2,632
FITEM,2,635
FITEM,2,639
FITEM,2,643
FITEM,2,647
FITEM,2,651
FITEM,2,655
FITEM,2,659
FITEM,2,663

```

```

FITEM,2,666
FITEM,2,669
FITEM,2,672
FITEM,2,675
FITEM,2,678
FITEM,2,680
FITEM,2,682
FITEM,2,684
FITEM,2,686
FITEM,2,688
FITEM,2,690
FITEM,2,694
FITEM,2,697
FITEM,2,700
FITEM,2,703
FITEM,2,706
FITEM,2,709
FITEM,2,712
FITEM,2,715
FITEM,2,718
FITEM,2,721
FITEM,2,724
FITEM,2,727
FITEM,2,730
FITEM,2,733
FITEM,2,736
FITEM,2,739
FITEM,2,742
FITEM,2,745
FITEM,2,748
FITEM,2,751
FITEM,2,754
FITEM,2,757
FITEM,2,760
FITEM,2,763
FITEM,2,766
FITEM,2,769
FITEM,2,772
FITEM,2,775
FITEM,2,778
FITEM,2,781
FITEM,2,783
FITEM,2,785
FITEM,2,787
FITEM,2,789
FITEM,2,791
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.004,.,.,

!          * PROPIEDADES DE LA 4ta. EXTRUSIÓN *
VSEL,s,volu,,235,239      !Propiedades del Aire
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,242,247
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,248,250
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,253,256
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,259,263
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,266,268
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,271,274
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,277,281
VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,284,286
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,289,292
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,295,299
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,302,304
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,307,310
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,240,241      !Propiedades del Acero
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,251,252
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,257,258
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,275,276
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,269,270
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,264,265
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,282,283
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,287,288
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,293,294
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,311,312
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,305,306
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,300,301
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

!          +- CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 4ta. EXTRUSIÓN +-
DA,871,ASYM              $DA,853,ASYM              $DA,838,ASYM
DA,836,ASYM              $DA,820,ASYM              $DA,1002,ASYM
DA,1018,ASYM             $DA,1030,ASYM             $DA,927,ASYM
DA,915,ASYM              $DA,899,ASYM              $DA,948,ASYM
DA,964,ASYM              $DA,981,ASYM

!          += CUARTO MALLADO +=
FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,235
FITEM,5,-312
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!          += QUINTA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,78
FITEM,2,793
FITEM,2,798
FITEM,2,802

```

FITEM,2,806	FITEM,2,1007
FITEM,2,810	FITEM,2,1010
FITEM,2,814	FITEM,2,1013
FITEM,2,818	FITEM,2,1016
FITEM,2,822	FITEM,2,1019
FITEM,2,825	FITEM,2,1021
FITEM,2,828	FITEM,2,1023
FITEM,2,831	FITEM,2,1025
FITEM,2,834	FITEM,2,1027
FITEM,2,837	FITEM,2,1029
FITEM,2,840	VEXT,P51X, , ,0,0,-0.761475,,,
FITEM,2,843	
FITEM,2,846	! * PROPIEDADES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN *
FITEM,2,849	VSEL,s,volu,,313,317 !Propiedades del Aire
FITEM,2,852	VATT,2,1,1
FITEM,2,855	VSEL,S,VOLU,,320,321
FITEM,2,858	VATT,2,1,1
FITEM,2,861	VSEL,S,VOLU,,326,328
FITEM,2,864	VATT,2,1,1
FITEM,2,867	VSEL,s,volu,,331,334
FITEM,2,870	VATT,2,1,1
FITEM,2,873	VSEL,s,volu,,337,341
FITEM,2,877	VATT,2,1,1
FITEM,2,881	VSEL,s,volu,,344,346
FITEM,2,885	VATT,2,1,1
FITEM,2,889	VSEL,s,volu,,349,352
FITEM,2,893	VATT,2,1,1
FITEM,2,897	VSEL,s,volu,,355,359
FITEM,2,901	VATT,2,1,1
FITEM,2,904	VSEL,s,volu,,362,364
FITEM,2,907	VATT,2,1,1
FITEM,2,910	VSEL,s,volu,,367,370
FITEM,2,913	VATT,2,1,1
FITEM,2,916	VSEL,s,volu,,373,377
FITEM,2,918	VATT,2,1,1
FITEM,2,920	VSEL,s,volu,,380,382
FITEM,2,922	VATT,2,1,1
FITEM,2,924	VSEL,S,VOLU,,385,388
FITEM,2,926	VATT,2,1,1
FITEM,2,928	VSEL,s,volu,,318,319 !Propiedades del Acero
FITEM,2,932	VATT,3,1,1
FITEM,2,935	VSEL,s,volu,,322,325
FITEM,2,938	VATT,3,1,1
FITEM,2,941	VSEL,s,volu,,329,330
FITEM,2,944	VATT,3,1,1
FITEM,2,947	VSEL,S,VOLU,,335,336
FITEM,2,950	VATT,3,1,1
FITEM,2,953	VSEL,S,VOLU,,353,354
FITEM,2,956	VATT,3,1,1
FITEM,2,959	VSEL,s,volu,,347,348
FITEM,2,962	VATT,3,1,1
FITEM,2,965	VSEL,s,volu,,342,343
FITEM,2,968	VATT,3,1,1
FITEM,2,971	VSEL,s,volu,,360,361
FITEM,2,974	VATT,3,1,1
FITEM,2,977	VSEL,s,volu,,365,366
FITEM,2,980	VATT,3,1,1
FITEM,2,983	VSEL,s,volu,,371,372
FITEM,2,986	VATT,3,1,1
FITEM,2,989	VSEL,s,volu,,389,390
FITEM,2,992	VATT,3,1,1
FITEM,2,995	VSEL,s,volu,,383,384
FITEM,2,998	VATT,3,1,1
FITEM,2,1001	VSEL,s,volu,,378,379
FITEM,2,1004	VATT,3,1,1

ALLSEL,ALL

! *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

DA,1111,ASYM	\$DA,1115,ASYM	\$DA,1119,ASYM
DA,1123,ASYM	\$DA,1127,ASYM	\$DA,1131,ASYM
DA,1135,ASYM	\$DA,1139,ASYM	\$DA,1142,ASYM
DA,1145,ASYM	\$DA,1148,ASYM	\$DA,1151,ASYM
DA,1154,ASYM	\$DA,1156,ASYM	\$DA,1158,ASYM
DA,1160,ASYM	\$DA,1162,ASYM	\$DA,1164,ASYM
DA,1031,ASYM	\$DA,1036,ASYM	\$DA,1040,ASYM
DA,1044,ASYM	\$DA,1048,ASYM	\$DA,1052,ASYM
DA,1056,ASYM	\$DA,1060,ASYM	\$DA,1063,ASYM
DA,1066,ASYM	\$DA,1069,ASYM	\$DA,1072,ASYM
DA,1075,ASYM	\$DA,1078,ASYM	\$DA,1081,ASYM
DA,1084,ASYM	\$DA,1087,ASYM	\$DA,1090,ASYM
DA,1093,ASYM	\$DA,1096,ASYM	\$DA,1099,ASYM
DA,1102,ASYM	\$DA,1105,ASYM	\$DA,1108,ASYM
DA,1221,ASYM	\$DA,1224,ASYM	\$DA,1227,ASYM
DA,1230,ASYM	\$DA,1233,ASYM	\$DA,1236,ASYM
DA,1239,ASYM	\$DA,1242,ASYM	\$DA,1245,ASYM
DA,1248,ASYM	\$DA,1251,ASYM	\$DA,1254,ASYM
DA,1257,ASYM	\$DA,1259,ASYM	\$DA,1261,ASYM
DA,1263,ASYM	\$DA,1265,ASYM	\$DA,1267,ASYM
DA,1166,ASYM	\$DA,1170,ASYM	\$DA,1173,ASYM
DA,1176,ASYM	\$DA,1179,ASYM	\$DA,1182,ASYM
DA,1185,ASYM	\$DA,1188,ASYM	\$DA,1191,ASYM
DA,1194,ASYM	\$DA,1197,ASYM	\$DA,1200,ASYM
DA,1203,ASYM	\$DA,1206,ASYM	\$DA,1209,ASYM
DA,1212,ASYM	\$DA,1215,ASYM	\$DA,1218,ASYM
DA,1109,ASYM	\$DA,1091,ASYM	\$DA,1076,ASYM
DA,1074,ASYM	\$DA,1058,ASYM	\$DA,1240,ASYM
DA,1256,ASYM	\$DA,1268,ASYM	\$DA,1165,ASYM
DA,1153,ASYM	\$DA,1137,ASYM	\$DA,1186,ASYM
DA,1202,ASYM	\$DA,1219,ASYM	

! *+ DIVISIONES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

LESIZE,1221,,,13,,,,,0

! =+ QUINTO MALLADO =+

FLST,5,78,6,ORDE,2

FITEM,5,313

FITEM,5,-390

CM,_Y,VOLU

VSEL,,,P51X

CM,_Y1,VOLU

CHKMSH,'VOLU'

CMSEL,S,_Y

!*

VMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

CÓDIGO DE UNA GRIETA A 45°

/PREP7

/Titulo, 3-D Análisis de tubería "CONDICION DE GRIETA 45°"

ET,1,SOLID97 !Define el tipo de elemento

/units,si !Selección de unidades

MP,MURX,1,1.2 !Permeabilidad del imán en X

MP,MURY,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Y

MP,MURZ,1,1.2 !Permeabilidad del imán en Z

MP,MGY,1,868000 !Magnetización del imán

MP,MURX,2,1 !Permeabilidad del aire

MP,MURX,3,2000 !Permeabilidad del acero

! * DIMENSIONES DEL IMÁN *

BLC4,0,0,0.0127,0.101855

BLC4,-0.0127,0,0.0127,0.101855

BLC4,-0.0127,-0.101855,0.0127,0.101855

BLC4,0,-0.101855,0.0127,0.101855

! * DIMENSIÓN RADIAL DEL TUBO *

CYL4,0,0,0, ,0.1026437091

CYL4,0,0,0, ,0.12233274182

CYL4,0,0,0, ,0.127255

CYL4,0,0,0, ,0.129109

CYL4,0,0,0, ,0.136525

ADELE,all

csys,1

K, ,0.136525,224.8,

K, ,0.07,45,

K, ,0.136525,225.2,

K, ,0.07,135,

K, ,0.07,225,

K, ,0.07,315,

K, ,0.136525,135,

K, ,0.136525,225,

K, ,0.136525,315,

K, ,0.136525,44.8,

K, ,0.136525,45,

K, ,0.136525,45.2,

csys,0

K, ,0.0127,0.136525,

K, ,0.0127,0.136525,

K, ,0.0127,-0.136525,

K, ,0.0127,-0.136525,

LSTR,34,36

LSTR,35,33

LOVLAP,all

LSTR,46,39

LSTR,48,37

FLST,2,5,4,ORDE,5

FITEM,2,5

FITEM,2,-6

FITEM,2,25

FITEM,2,29

FITEM,2,33

LOVLAP,P51X

LDELE,15,0

LDELE,16,0

KDELE,37

KDELE,39

LSTR,49,3

LSTR,50,8

LSTR,51,14

LSTR,52,9

!LSTR,52,9

ILSTR,51,14

ILSTR,45,42

LSTR,47,38

LSTR,43,40

LSTR,44,41

LSTR,45,42

LOVLAP,all

LSTR,38,40

LSTR,38,42

LSTR,41,40

LSTR,41,42

LSTR,7,37

LSTR,6,37

LDELE,136,0

LDELE,137,0

LDELE,138,0

LDELE,139,0

KDELE,49

KDELE,50

KDELE,51

KDELE,52

LOVLAP,all

! * Generar áreas *

AL,1,16,17,136	\$AL,23,16,36,35	\$AL,36,33,100,118
AL,57,100,79,156	\$AL,61,79,7,15	\$AL,65,7,11,20
AL,69,11,13,18	\$AL,15,157,75	\$AL,14,157,77
AL,75,20,158,78	\$AL,77,37,158,130	\$AL,78,18,134,132
AL,130,19,134,133	\$AL,35,24,118,88	\$AL,88,84,156,150
AL,14,150,76,140	\$AL,37,76,128,154	\$AL,19,128,135,155
AL,136,25,24,3	\$AL,3,44,46	\$AL,44,58,84,96
AL,96,62,140,82	\$AL,82,66,154,91	\$AL,91,70,155,108
AL,39,27,17,74	\$AL,26,43,27,38	\$AL,34,101,43,119
AL,59,101,114,164	\$AL,63,114,85,163	\$AL,67,85,98,162
AL,71,98,112,122	\$AL,38,119,29,102	\$AL,164,102,151,93
AL,163,151,159,147	\$AL,162,159,165,148	\$AL,122,165,125,149
AL,74,29,25,45	\$AL,45,46,49	\$AL,49,93,58,97
AL,97,147,62,83	\$AL,83,148,66,92	\$AL,92,149,70,111
AL,39,21,28,137	\$AL,26,28,50,51	\$AL,34,50,103,120
AL,59,103,115,170	\$AL,63,115,86,169	\$AL,67,86,99,168
AL,71,99,113,126	\$AL,51,120,30,104	\$AL,170,104,152,95
AL,169,152,160,146	\$AL,168,160,166,145	\$AL,126,166,127,144
AL,137,30,31,9	\$AL,9,54,52	\$AL,52,60,95,109
AL,109,146,64,89	\$AL,89,145,68,123	\$AL,123,144,72,116
AL,1,21,22,138	\$AL,22,23,73,55	\$AL,55,33,121,106
AL,57,106,80,171	\$AL,61,80,81,172	\$AL,65,81,90,173
AL,69,90,107,131	\$AL,73,121,32,105	\$AL,171,105,153,94
AL,172,153,161,143	\$AL,173,161,167,142	\$AL,131,167,129,141
AL,138,31,32,53	\$AL,53,54,56	\$AL,56,60,94,110
AL,110,64,143,87	\$AL,87,68,142,124	\$AL,124,72,141,117

! += PRIMERA EXTRUSIÓN +=

FLST,2,78,5,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-78

VEXT,P51X, , ,0,0,0.0254,.,.,.

! * PROPIEDADES DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *

VSEL,S,VOLU,,1 !Propiedades del Imán

VATT,1,1,1

VSEL,S,VOLU,,19

VATT,1,1,1

VSEL,s,volu,,25

VATT,1,1,1

VSEL,s,volu,,37

VATT,1,1,1		DA,159,ASYM	\$DA,269,ASYM	\$DA,214,ASYM
VSEL,s,volu,,61		DA,305,ASYM	\$DA,251,ASYM	\$DA,157,ASYM
VATT,1,1,1		DA,139,ASYM	\$DA,124,ASYM	\$DA,122,ASYM
VSEL,s,volu,,73		DA,106,ASYM	\$DA,288,ASYM	\$DA,304,ASYM
VATT,1,1,1		DA,316,ASYM	\$DA,213,ASYM	\$DA,201,ASYM
VSEL,s,volu,,43		DA,185,ASYM	\$DA,234,ASYM	\$DA,250,ASYM
VATT,1,1,1		DA,267,ASYM	\$DA,19,ASYM	\$DA,37,ASYM
VSEL,s,volu,,55		DA,1,ASYM	\$DA,25,ASYM	\$DA,61,ASYM
VATT,1,1,1		DA,43,ASYM	\$DA,73,ASYM	\$DA,55,ASYM
VSEL,s,volu,,2,5	!Propiedades del Aire	!	* Divisiones del 1er mallado *	
VATT,2,1,1		LESIZE,195,,,11,,,,,0	\$LESIZE,229,,,11,,,,,0	\$LESIZE,298,,,11,,,,,0
VSEL,S,VOLU,,8,9		LESIZE,281,,,11,,,,,0	\$LESIZE,326,,,11,,,,,0	\$LESIZE,342,,,11,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,396,,,11,,,,,0	\$LESIZE,380,,,11,,,,,0	\$LESIZE,194,,,3,,,,,0
VSEL,S,VOLU,,14,16		LESIZE,189,,,2,,,,,0	\$LESIZE,184,,,4,,,,,0	\$LESIZE,179,,,16,,,,,0
VATT,2,1,1		LESIZE,305,,,4,,,,,0	\$LESIZE,247,,,4,,,,,0	\$LESIZE,249,,,4,,,,,0
VSEL,s,volu,,20,22		!	* MALLADO 1 *	
VATT,2,1,1		VMESH,ALL		
VSEL,s,volu,,38,40		!	=+ SEGUNDA EXTRUSIÓN +=	
VATT,2,1,1		FLST,2,78,5,ORDE,78		
VSEL,s,volu,,26,29		FITEM,2,79		
VATT,2,1,1		FITEM,2,84		
VSEL,s,volu,,32,34		FITEM,2,88		
VATT,2,1,1		FITEM,2,92		
VSEL,s,volu,,44,47		FITEM,2,96		
VATT,2,1,1		FITEM,2,100		
VSEL,s,volu,,50,52		FITEM,2,104		
VATT,2,1,1		FITEM,2,108		
VSEL,s,volu,,56,58		FITEM,2,111		
VATT,2,1,1		FITEM,2,114		
VSEL,s,volu,,74,76		FITEM,2,117		
VATT,2,1,1		FITEM,2,120		
VSEL,s,volu,,62,65		FITEM,2,123		
VATT,2,1,1		FITEM,2,126		
VSEL,S,VOLU,,68,70		FITEM,2,129		
VATT,2,1,1		FITEM,2,132		
VSEL,s,volu,,6,7	!Propiedades del Acero	FITEM,2,135		
VATT,3,1,1		FITEM,2,138		
VSEL,s,volu,,10,13		FITEM,2,141		
VATT,3,1,1		FITEM,2,144		
VSEL,s,volu,,17,18		FITEM,2,147		
VATT,3,1,1		FITEM,2,150		
VSEL,S,VOLU,,23,24		FITEM,2,153		
VATT,3,1,1		FITEM,2,156		
VSEL,s,volu,,41,42		FITEM,2,159		
VATT,3,1,1		FITEM,2,163		
VSEL,s,volu,,35,36		FITEM,2,167		
VATT,3,1,1		FITEM,2,171		
VSEL,s,volu,,30,31		FITEM,2,175		
VATT,3,1,1		FITEM,2,179		
VSEL,s,volu,,48,49		FITEM,2,183		
VATT,3,1,1		FITEM,2,187		
VSEL,s,volu,,53,54		FITEM,2,190		
VATT,3,1,1		FITEM,2,193		
VSEL,s,volu,,77,78		FITEM,2,196		
VATT,3,1,1		FITEM,2,199		
VSEL,s,volu,,71,72		FITEM,2,202		
VATT,3,1,1		FITEM,2,204		
VSEL,s,volu,,66,67		FITEM,2,206		
VATT,3,1,1		FITEM,2,208		
ALLSEL,ALL		FITEM,2,210		
!	* CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 1ra. EXTRUSIÓN *	FITEM,2,212		
DA,202,ASYM	\$DA,141,ASYM	\$DA,79,ASYM	FITEM,2,214	

FITEM,2,218	VATT,3,1,1
FITEM,2,221	VSEL,s,volu,,88,91
FITEM,2,224	VATT,3,1,1
FITEM,2,227	VSEL,s,volu,,95,96
FITEM,2,230	VATT,3,1,1
FITEM,2,233	VSEL,S,VOLU,,101,102
FITEM,2,236	VATT,3,1,1
FITEM,2,239	VSEL,S,VOLU,,119,120
FITEM,2,242	VATT,3,1,1
FITEM,2,245	VSEL,s,volu,,113,114
FITEM,2,248	VATT,3,1,1
FITEM,2,251	VSEL,s,volu,,108,109
FITEM,2,254	VATT,3,1,1
FITEM,2,257	VSEL,s,volu,,126,127
FITEM,2,260	VATT,3,1,1
FITEM,2,263	VSEL,s,volu,,131,132
FITEM,2,266	VATT,3,1,1
FITEM,2,269	VSEL,s,volu,,137,138
FITEM,2,272	VATT,3,1,1
FITEM,2,275	VSEL,s,volu,,155,156
FITEM,2,278	VATT,3,1,1
FITEM,2,281	VSEL,s,volu,,149,150
FITEM,2,284	VATT,3,1,1
FITEM,2,287	VSEL,s,volu,,144,145
FITEM,2,290	VATT,3,1,1
FITEM,2,293	ALLSEL,ALL
FITEM,2,296	
FITEM,2,299	! * CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 2da. EXTRUSIÓN *
FITEM,2,302	DA,317,ASYM \$DA,322,ASYM \$DA,326,ASYM
FITEM,2,305	DA,330,ASYM \$DA,334,ASYM \$DA,338,ASYM
FITEM,2,307	DA,342,ASYM \$DA,346,ASYM \$DA,349,ASYM
FITEM,2,309	DA,352,ASYM \$DA,355,ASYM \$DA,358,ASYM
FITEM,2,311	DA,361,ASYM \$DA,364,ASYM \$DA,367,ASYM
FITEM,2,313	DA,370,ASYM \$DA,373,ASYM \$DA,376,ASYM
FITEM,2,315	DA,379,ASYM \$DA,382,ASYM \$DA,385,ASYM
VEXT,P51X, , ,0,0,0.9,,,	DA,388,ASYM \$DA,391,ASYM \$DA,394,ASYM
	DA,397,ASYM \$DA,401,ASYM \$DA,405,ASYM
! * PROPIEDADES DE LA 2da. EXTRUSIÓN	DA,409,ASYM \$DA,413,ASYM \$DA,417,ASYM
VSEL,s,volu,,79,83 !Propiedades del Aire	DA,421,ASYM \$DA,425,ASYM \$DA,428,ASYM
VATT,2,1,1	DA,431,ASYM \$DA,434,ASYM \$DA,437,ASYM
VSEL,S,VOLU,,86,87	DA,440,ASYM \$DA,442,ASYM \$DA,444,ASYM
VATT,2,1,1	DA,446,ASYM \$DA,448,ASYM \$DA,450,ASYM
VSEL,S,VOLU,,92,94	DA,452,ASYM \$DA,456,ASYM \$DA,459,ASYM
VATT,2,1,1	DA,462,ASYM \$DA,465,ASYM \$DA,468,ASYM
VSEL,s,volu,,97,100	DA,471,ASYM \$DA,474,ASYM \$DA,477,ASYM
VATT,2,1,1	DA,480,ASYM \$DA,483,ASYM \$DA,486,ASYM
VSEL,s,volu,,103,107	DA,489,ASYM \$DA,492,ASYM \$DA,495,ASYM
VATT,2,1,1	DA,498,ASYM \$DA,501,ASYM \$DA,504,ASYM
VSEL,s,volu,,110,112	DA,507,ASYM \$DA,510,ASYM \$DA,513,ASYM
VATT,2,1,1	DA,516,ASYM \$DA,519,ASYM \$DA,522,ASYM
VSEL,s,volu,,115,118	DA,525,ASYM \$DA,528,ASYM \$DA,531,ASYM
VATT,2,1,1	DA,534,ASYM \$DA,537,ASYM \$DA,540,ASYM
VSEL,s,volu,,121,125	DA,543,ASYM \$DA,545,ASYM \$DA,547,ASYM
VATT,2,1,1	DA,549,ASYM \$DA,551,ASYM \$DA,553,ASYM
VSEL,s,volu,,128,130	DA,395,ASYM \$DA,377,ASYM \$DA,362,ASYM
VATT,2,1,1	DA,360,ASYM \$DA,344,ASYM \$DA,526,ASYM
VSEL,s,volu,,133,136	DA,542,ASYM \$DA,554,ASYM \$DA,451,ASYM
VATT,2,1,1	DA,439,ASYM \$DA,423,ASYM \$DA,472,ASYM
VSEL,s,volu,,139,143	DA,488,ASYM \$DA,505,ASYM
VATT,2,1,1	
VSEL,s,volu,,146,148	! *+ SEGUNDO MALLADO +*
VATT,2,1,1	FLST,5,78,6,ORDE,2
VSEL,S,VOLU,,151,154	FITEM,5,79
VATT,2,1,1	FITEM,5,-156
VSEL,s,volu,,84,85 !Propiedades del Acero	CM,_Y,VOLU

```

VSEL,,,P51X
CM_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!      += TERCERA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-78
VEXT,P51X,,0,0,-0.134525,,,

!      * PROPIEDADES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN
VSEL,s,volu,,157,161      !Propiedades del Aire
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,164,165
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,170,172
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,175,178
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,181,185
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,188,190
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,193,196
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,199,203
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,206,208
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,211,214
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,217,221
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,224,226
VATT,2,1,1
VSEL,S,VOLU,,229,232
VATT,2,1,1
VSEL,s,volu,,162,163      !Propiedades del Acero
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,166,169
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,173,174
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,179,180
VATT,3,1,1
VSEL,S,VOLU,,197,198
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,191,192
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,186,187
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,204,205
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,209,210
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,215,216

VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,233,234
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,227,228
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,222,223
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

!      *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *+
DA,633,ASYM      $DA,615,ASYM      $DA,600,ASYM
DA,598,ASYM      $DA,582,ASYM      $DA,764,ASYM
DA,780,ASYM      $DA,792,ASYM      $DA,689,ASYM
DA,677,ASYM      $DA,661,ASYM      $DA,710,ASYM
DA,726,ASYM      $DA,743,ASYM

!      *+ DIVISIONES DE LA 3ra. EXTRUSIÓN *+
LESIZE,735,,,2,,,,,0

!      += TERCER MALLADO +=
FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,157
FITEM,5,-234
CM_Y,VOLU
VSEL,,,P51X
CM_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

!      += CUARTA EXTRUSIÓN +=
FLST,2,78,5,ORDE,78
FITEM,2,555
FITEM,2,560
FITEM,2,564
FITEM,2,568
FITEM,2,572
FITEM,2,576
FITEM,2,580
FITEM,2,584
FITEM,2,587
FITEM,2,590
FITEM,2,593
FITEM,2,596
FITEM,2,599
FITEM,2,602
FITEM,2,605
FITEM,2,608
FITEM,2,611
FITEM,2,614
FITEM,2,617
FITEM,2,620
FITEM,2,623
FITEM,2,626
FITEM,2,629
FITEM,2,632
FITEM,2,635
FITEM,2,639
FITEM,2,643

```

FITEM,2,647	VATT,2,1,1		
FITEM,2,651	VSEL,s,volu,,271,274		
FITEM,2,655	VATT,2,1,1		
FITEM,2,659	VSEL,s,volu,,277,281		
FITEM,2,663	VATT,2,1,1		
FITEM,2,666	VSEL,s,volu,,284,286		
FITEM,2,669	VATT,2,1,1		
FITEM,2,672	VSEL,s,volu,,289,292		
FITEM,2,675	VATT,2,1,1		
FITEM,2,678	VSEL,s,volu,,295,299		
FITEM,2,680	VATT,2,1,1		
FITEM,2,682	VSEL,s,volu,,302,304		
FITEM,2,684	VATT,2,1,1		
FITEM,2,686	VSEL,S,VOLU,,307,310		
FITEM,2,688	VATT,2,1,1		
FITEM,2,690	VSEL,s,volu,,240,241	!Propiedades del Acero	
FITEM,2,694	VATT,3,1,1		
FITEM,2,697	VSEL,s,volu,,246,247		
FITEM,2,700	VATT,3,1,1		
FITEM,2,703	VSEL,s,volu,,251,252		
FITEM,2,706	VATT,3,1,1		
FITEM,2,709	VSEL,S,VOLU,,257,258		
FITEM,2,712	VATT,3,1,1		
FITEM,2,715	VSEL,S,VOLU,,275,276		
FITEM,2,718	VATT,3,1,1		
FITEM,2,721	VSEL,s,volu,,269,270		
FITEM,2,724	VATT,3,1,1		
FITEM,2,727	VSEL,s,volu,,264,265		
FITEM,2,730	VATT,3,1,1		
FITEM,2,733	VSEL,s,volu,,282,283		
FITEM,2,736	VATT,3,1,1		
FITEM,2,739	VSEL,s,volu,,287,288		
FITEM,2,742	VATT,3,1,1		
FITEM,2,745	VSEL,s,volu,,293,294		
FITEM,2,748	VATT,3,1,1		
FITEM,2,751	VSEL,s,volu,,311,312		
FITEM,2,754	VATT,3,1,1		
FITEM,2,757	VSEL,s,volu,,305,306		
FITEM,2,760	VATT,3,1,1		
FITEM,2,763	VSEL,s,volu,,300,301		
FITEM,2,766	VATT,3,1,1		
FITEM,2,769	ALLSEL,ALL		
FITEM,2,772			
FITEM,2,775	!	*+ cONDICIONES DE FRONTERA DE LA 4ta. EXTRUSIÓN +*	
FITEM,2,778	DA,871,ASYM	\$DA,853,ASYM	\$DA,838,ASYM
FITEM,2,781	DA,836,ASYM	\$DA,820,ASYM	\$DA,1002,ASYM
FITEM,2,783	DA,1018,ASYM	\$DA,1030,ASYM	\$DA,927,ASYM
FITEM,2,785	DA,915,ASYM	\$DA,899,ASYM	\$DA,948,ASYM
FITEM,2,787	DA,964,ASYM	\$DA,981,ASYM	
FITEM,2,789			
FITEM,2,791	!	+= CUARTO MALLADO +=	
VEXT,P51X, , ,0,0,-0.004,...	FLST,5,78,6,ORDE,2		
	FITEM,5,235		
!	FITEM,5,-312		
* PROPIEDADES DE LA 4ta. EXTRUSIÓN *	CM,_Y,VOLU		
VSEL,s,volu,,235,239	VSEL, , , ,P51X		
!Propiedades del Aire	CM,_Y1,VOLU		
VATT,2,1,1	CHKMSH,'VOLU'		
VSEL,S,VOLU,,242,245	CMSEL,S,_Y		
VATT,2,1,1	!*		
VSEL,S,VOLU,,248,250	VMESH,_Y1		
VATT,2,1,1	!*		
VSEL,s,volu,,253,256	CMDELE,_Y		
VATT,2,1,1	CMDELE,_Y1		
VSEL,s,volu,,259,263	CMDELE,_Y2		
VATT,2,1,1			
VSEL,s,volu,,266,268			

!*

! += QUINTA EXTRUSIÓN +=

FLST,2,78,5,ORDE,78

FITEM,2,793

FITEM,2,798

FITEM,2,802

FITEM,2,806

FITEM,2,810

FITEM,2,814

FITEM,2,818

FITEM,2,822

FITEM,2,825

FITEM,2,828

FITEM,2,831

FITEM,2,834

FITEM,2,837

FITEM,2,840

FITEM,2,843

FITEM,2,846

FITEM,2,849

FITEM,2,852

FITEM,2,855

FITEM,2,858

FITEM,2,861

FITEM,2,864

FITEM,2,867

FITEM,2,870

FITEM,2,873

FITEM,2,877

FITEM,2,881

FITEM,2,885

FITEM,2,889

FITEM,2,893

FITEM,2,897

FITEM,2,901

FITEM,2,904

FITEM,2,907

FITEM,2,910

FITEM,2,913

FITEM,2,916

FITEM,2,918

FITEM,2,920

FITEM,2,922

FITEM,2,924

FITEM,2,926

FITEM,2,928

FITEM,2,932

FITEM,2,935

FITEM,2,938

FITEM,2,941

FITEM,2,944

FITEM,2,947

FITEM,2,950

FITEM,2,953

FITEM,2,956

FITEM,2,959

FITEM,2,962

FITEM,2,965

FITEM,2,968

FITEM,2,971

FITEM,2,974

FITEM,2,977

FITEM,2,980

FITEM,2,983

FITEM,2,986

FITEM,2,989

FITEM,2,992

FITEM,2,995

FITEM,2,998

FITEM,2,1001

FITEM,2,1004

FITEM,2,1007

FITEM,2,1010

FITEM,2,1013

FITEM,2,1016

FITEM,2,1019

FITEM,2,1021

FITEM,2,1023

FITEM,2,1025

FITEM,2,1027

FITEM,2,1029

VEXT,P51X, , ,0,0,-0.9,.,.,

! * PROPIEDADES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN *

VSEL,s,volu,,313,317 !Propiedades del Aire

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,320,321

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,326,328

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,331,334

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,337,341

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,344,346

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,349,352

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,355,359

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,362,364

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,367,370

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,373,377

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,380,382

VATT,2,1,1

VSEL,S,VOLU,,385,388

VATT,2,1,1

VSEL,s,volu,,318,319 !Propiedades del Acero

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,322,325

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,329,330

VATT,3,1,1

VSEL,S,VOLU,,335,336

VATT,3,1,1

VSEL,S,VOLU,,353,354

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,347,348

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,342,343

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,360,361

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,365,366

VATT,3,1,1

VSEL,s,volu,,371,372

VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,389,390
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,383,384
VATT,3,1,1
VSEL,s,volu,,378,379
VATT,3,1,1
ALLSEL,ALL

! *+ CONDICIONES DE FRONTERA DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

DA,1111,ASYM	\$DA,1115,ASYM	\$DA,1119,ASYM
DA,1123,ASYM	\$DA,1127,ASYM	\$DA,1131,ASYM
DA,1135,ASYM	\$DA,1139,ASYM	\$DA,1142,ASYM
DA,1145,ASYM	\$DA,1148,ASYM	\$DA,1151,ASYM
DA,1154,ASYM	\$DA,1156,ASYM	\$DA,1158,ASYM
DA,1160,ASYM	\$DA,1162,ASYM	\$DA,1164,ASYM
DA,1031,ASYM	\$DA,1036,ASYM	\$DA,1040,ASYM
DA,1044,ASYM	\$DA,1048,ASYM	\$DA,1052,ASYM
DA,1056,ASYM	\$DA,1060,ASYM	\$DA,1063,ASYM
DA,1066,ASYM	\$DA,1069,ASYM	\$DA,1072,ASYM
DA,1075,ASYM	\$DA,1078,ASYM	\$DA,1081,ASY
DA,1084,ASYM	\$DA,1087,ASYM	\$DA,1090,ASYM
DA,1093,ASYM	\$DA,1096,ASYM	\$DA,1099,ASYM
DA,1102,ASYM	\$DA,1105,ASYM	\$DA,1108,ASYM
DA,1221,ASYM	\$DA,1224,ASYM	\$DA,1227,ASYM
DA,1230,ASYM	\$DA,1233,ASYM	\$DA,1236,ASYM
DA,1239,ASYM	\$DA,1242,ASYM	\$DA,1245,ASYM
DA,1248,ASYM	\$DA,1251,ASYM	\$DA,1254,ASYM
DA,1257,ASYM	\$DA,1259,ASYM	\$DA,1261,ASYM
DA,1263,ASYM	\$DA,1265,ASYM	\$DA,1267,ASYM
DA,1166,ASYM	\$DA,1170,ASYM	\$DA,1173,ASYM
DA,1176,ASYM	\$DA,1179,ASYM	\$DA,1182,ASYM
DA,1185,ASYM	\$DA,1188,ASYM	\$DA,1191,ASYM
DA,1194,ASYM	\$DA,1197,ASYM	\$DA,1200,ASYM
DA,1203,ASYM	\$DA,1206,ASYM	\$DA,1209,ASYM
DA,1212,ASYM	\$DA,1215,ASYM	\$DA,1218,ASYM
DA,1109,ASYM	\$DA,1091,ASYM	\$DA,1076,ASYM
DA,1074,ASYM	\$DA,1058,ASYM	\$DA,1240,ASYM
DA,1256,ASYM	\$DA,1268,ASYM	\$DA,1165,ASYM
DA,1153,ASYM	\$DA,1137,ASYM	\$DA,1186,ASYM
DA,1202,ASYM	\$DA,1219,ASYM	

! *+ DIVISIONES DE LA 5ta. EXTRUSIÓN +*

LESIZE,1221,,,13,,,,,0

! =+ QUINTO MALLADO =+

FLST,5,78,6,ORDE,2
FITEM,5,313
FITEM,5,-390
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*