4 Estudo da estrutura cilíndrica

4.1. Introdução

A segurança no transporte de óleo e gás na indústria do petróleo requer o estabelecimento de procedimentos de inspeção da tubulação para evitar vazamentos que possam causar graves acidentes com danos às comunidades e ao meio ambiente que circundam as tubulações. Uma das estratégias para manter a segurança da operação é a realização de inspeções internas utilizando equipamentos do tipo 'pigs' para determinar anomalias do tipo ovalizações, amassamentos e corrosões que podem ser encontradas no interior dos dutos.

Os "pigs" tradicionais utilizam a indução de um campo eletromagnético estático onde a parede metálica do duto é parte do circuito magnético. Alterações na forma e na composição das paredes metálicas produzem modificações no campo magnético induzido, as quais são registradas e processadas posteriormente. Alternativamente, uma onda eletromagnética poderia ser excitada no interior da tubulação e as alterações nas paredes do tubo, ou nas condições de contorno para os campos, produziriam alterações nas características de propagação da onda. Estas alterações nos campos da onda poderiam ser detectadas e associadas às deformações nas paredes internas da tubulação. Para avaliar o potencial de utilização de uma onda eletromagnética para detecção de anomalias na tubulação, Método de Elementos Finitos será utilizado para determinar a distribuição de campo no interior do dispositivo de inspeção e identificar as variações de campo em função das anomalias.

Para esta análise, o dispositivo será representado por uma estrutura coaxial sustentada por discos plásticos espessos, como mostrado na Figura 4.1. Além de sustentar o cilindro interno que contém o equipamento eletrônico, os discos plásticos têm a finalidade limpar as paredes internas da tubulação, devendo, portanto, apresentar rigidez mecânica adequada para realizar tal tarefa. Para simplificar o modelo utilizado neste estudo, será suposto que exista uma estrutura

de adaptação fora da região definida pelos discos dielétricos. Estes adaptadores minimizam as reflexões a serem geradas pelo meio externo ao dispositivo. Para este estudo será suposto que o dispositivo seja excitado por uma diferença de potencial V entre um pequeno espaçamento existente entre o disco metálico e a parede interna da tubulação. Esta diferença de potencial será gerada por uma fonte eletromagnética operando a uma freqüência *f* que irá gerar campos se propagando no interior da estrutura coaxial. Para concentrar a análise no interior do dispositivo entre os discos plásticos, será suposto que a parte externa se comporte com uma estrutura de casamento que absorverá os campos transmitidos através dos discos plásticos. Para este estudo, o disco metálico será colocado eqüidistante entre os discos plásticos de sustentação, e os diâmetros dos cilindros internos e externos foram dimensionados para que exista a propagação exclusiva do modo TEM na região entre os discos plásticos de suporte. Para permitir a utilização da versão do MEF apresentada no Capítulo 3, serão consideradas somente anomalias circularmente simétricas.

Para explorar as características do modelo de alimentação utilizado para excitar o dispositivo, o estudo será realizado em duas etapas. Na primeira, denominada etapa com alimentação do Tipo I, os campos serão excitados por uma onda TEM em uma porta situada na posição do disco metálico, desconsiderandose a presença desse disco no meio do dispositivo. As dimensões da porta correspondem às dimensões entre os cilindros interno e externo. Na segunda etapa, denominada Tipo II, o modelo de alimentação corresponde a uma diferença de potencial V entre o cilindro externo e o disco metálico no meio do dispositivo, como mostra a Figura 4.1.



Figura 4.1.: Estrutura cilíndrica com diferença de potencial V.

4.2. Validação do Algoritmo

Para comprovar a eficiência do algoritmo, o campo magnético será calculado em uma estrutura cilíndrica lisa (sem deformações) e sem perdas, utilizando a alimentação do Tipo I, onde o guia é excitado apenas pelo modo TEM. A estrutura onde será aplicado o método dos elementos finitos possui 23 cm de comprimento ao longo do eixo z e 5 cm de largura, como mostra a Figura 4.2.



Figura 4.2.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I e sem dielétrico.

As Figura 4.3 (a) e (b) mostram as formas de onda do campo magnético ao longo das linhas de ρ constante para freqüências de 1 e 2 GHz. Como a estrutura não tem perdas, o campo magnético ao longo do eixo ρ é aproximadamente constante e seu valor oscila em torno do valor do campo aplicado na porta de entrada $H_0^i = 1/(\eta_1 \rho)$.



(a) f=1GHz



(b) f=2GHz

Figura 4.3.: Campo magnético para uma estrutura lisa e sem perdas.

4.3. Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo I e Sem Deformações na Superfície

Para realizar o estudo dos campos magnéticos no duto cilíndrico será utilizado um modelo simplificado com paredes lisas, isto é, sem deformações na superfície. Os resultados para este modelo serão utilizados como referência para o estudo de modelos com ranhuras na parede apresentados nas seções seguintes.

A distribuição de campo eletromagnético será calculada em uma estrutura metálica coaxial circularmente simétrica em torno do eixo longitudinal coincidente com o eixo z das coordenadas cilíndricas e com alimentação do Tipo I, onde apenas o modo fundamental TEM se propaga nas portas S_1 de entrada e S_2 de saída, conforme ilustrado na Figura 4.4. Entre as paredes metálicas será suposto que existe ar caracterizado pela permissividade e permeabilidade constantes (ε_0, μ_0), com permeabilidade e permissividade relativas iguais a unidade. Um dielétrico de 2 cm de espessura com permissividade elétrica relativa igual a 3 ($\varepsilon_R = 3$) foi colocado entre as posições z=21cm e z=23cm, conforme indicado na Figura 4.4.



Figura 4.4.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I.

O malhador utilizado foi o MGSetup_5.20, que definiu uma malha uniforme com 80 pontos distribuídos ao longo da linha entre as posições $\rho = 15cm$ e $\rho = 20cm$, e 300 pontos entre as posições z = 0cm e z = 23cm. Dessa forma, a região de estudo foi preenchida por 24.381 nós, distribuídos uniformemente por toda a seção retangular do duto (5*cm* de largura por 23*cm* de comprimento), aos quais estão associados 48000 elementos triangulares para a aplicação do MEF. Essa grade densa foi utilizada para que fosse possível perceber as pequenas variações de campo que ocorrem ao longo do duto.

Para a freqüência de 1GHz, a Figura 4.5 e a Figura 4.6 mostram a amplitude do campo magnético obtido através da aplicação do método (MEF) ao longo das linhas ρ =15,18,19, e 19,5 cm. Como observado nestas figuras, devido à presença do dielétrico, parte da energia incidente sobre o disco é refletida, gerando a presença de onda estacionária entre o disco e a fonte, que pode ser observada pela oscilação da amplitude dos campos ao longo das linhas de ρ constante. A partir dos valores máximo e mínimo de campo ao longo de cada linha de ρ constante, mostrados na Figura 4.5, pode-se calcular aproximadamente o valor das amplitudes das ondas incidentes e refletidas e estabelecer que o coeficiente da onda refletida é da ordem de 0,27, como mostrado na Tabela 4.1. Devido às dimensões do dispositivo e a ausência de descontinuidades nas paredes, este valor para o coeficiente de reflexão é coerente com o obtido a partir da Equação 4.1, supondo a propagação exclusiva do modo fundamental TEM :

Equation Section (Next)

$$\left|\rho\right| = \frac{\left|\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} - \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}\right|}{\sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} + \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}} = 0,2679 \cong 27\%$$
(3.1)

onde o meio 1 é o ar $(\varepsilon_1 = \varepsilon_0; \mu_1 = \mu_0)$ e o meio 2 é o dielétrico $(\varepsilon_2 = 3\varepsilon_0; \mu_2 = \mu_0)$.

	$\rho = 15cm$	$\rho = 18cm$	$\rho = 19cm$	$\rho = 19,5cm$
Amplitude da	0.01775	0.01485	0.01390	0.01380
Onda Incidente	0.01770	0.01100	0.01290	0.01200
Amplitude da	0.00475	0.00385	0.00380	0.00380
Onda Refletida	0.00175	0.00505	0.00500	0.00500
Coeficiente de	26.76	25.92	27 34	27 54
Reflexão (%)	20,70	23,72	27,37	27,34

Tabela 4.1.: Amplitudes das ondas incidentes e refletidas.

Ao longo das linhas de ρ constante, pode-se observar também que a fase dos campos apresenta variação idêntica, quase linear entre 0° e 180°, como mostra a Figura 4.6, e as pequenas discrepâncias em relação à variação linear são devido à presença da onda refletida. Nesta figura, as curvas para as fases se sobrepuseram, sendo representadas por uma única curva.



Figura 4.5.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície, alimentação Tipo I e freqüência de 1GHz.

69



Figura 4.6.: Fase de um duto sem deformações na superfície, alimentação Tipo I e freqüência de 1GHz.

As Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram a amplitude do campo magnético obtido pela análise MEF para a freqüência de 2 GHz. Novamente, como para esta freqüência existe a propagação exclusiva do modo fundamental TEM, o coeficiente de reflexão observado é aproximadamente o mesmo que o observado para 1 GHz.

Como mostrado nas Figura 4.5 e Figura 4.7, a partir da seção z=23cm existe a propagação exclusiva do modo TEM na direção z-positiva, indicado por uma amplitude de campo magnético constante.



Figura 4.7.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo I para freqüência de 2GHz.



Figura 4.8.: Fase de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo I para freqüência de 2GHz.

Estrutura Cilíndrica com Alimentação Tipo I e Com Deformação na Superfície

A presença de uma deformação na parede externa irá modificar a distribuição dos campos entre os cilindros. Para avaliar a relação entre esta deformação na parede e a perturbação na distribuição de campo, o MEF será utilizado para determinar a distribuição de campo magnético produzido pela presença de uma corrugação retangular na parede externa com diferentes dimensões, em diversas posições e em diferentes freqüências. Nesta análise, a estrutura cilíndrica é idêntica à utilizada na Seção 4.3, excetuando a presença da corrugação retangular, como mostrado na Figura 4.9.

Como primeiro exemplo, será considerada uma corrugação com 1 cm de comprimento e 1 cm de profundidade, conforme indicado na Figura 4.9. Novamente a alimentação do Tipo I é aplicada, onde apenas o modo fundamental TEM se propaga nas portas S_1 de entrada e S_2 de saída. Entre as paredes metálicas continua existindo ar (ε_0, μ_0) e o mesmo dielétrico com permissividade elétrica relativa igual a 3 (ε_R =3) entre as posições z=21*cm* e z=23*cm* é utilizado



Figura 4.9.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo I e deformação na superfície.

A análise do campo magnético excitado no interior do duto será dividida em três partes, que serão apresentadas nas seções a seguir. A primeira seção mostrará o efeito da variação da freqüência de excitação no duto. A segunda e a terceira seção irão apresentar como o campo se comporta mediante a variação da posição e do tamanho da ranhura, respectivamente.

4.4.1. Variação da Freqüência de Excitação do Duto

A análise do comportamento da distribuição de campo magnético em função da freqüência de excitação no duto será feita considerando-se as seguintes freqüências: 0,5 GHz, 1,0 GHz e 2,0 GHz. A deformação utilizada possui 1 cm de comprimento por 1 cm de largura e está localizada entre as posições z=5cm e z=6cm do duto.

Para se fazer o cálculo do campo magnético via MEF, a região de estudo foi preenchida novamente por 24.381 nós distribuídos por toda a seção retangular do duto (5*cm* de largura por 23*cm* de comprimento). Porém, nesse caso, os nós foram distribuídos de forma diferente. A densidade de nós foi maior na região da ranhura para representar os modos superiores excitados na deformação e ficaram mais esparsos nas outras regiões. Assim como na seção anterior, foram utilizados 48.000 elementos triangulares para a aplicação do MEF. O mesmo número de nós (24.381) pôde ser utilizado, pois já é um valor suficientemente grande para identificar as pequenas variações de campo na região da deformação.

Para ilustrar as diferenças de campo magnético devido à presença da deformação na parede, os gráficos na Figura 4.11 mostram a variação percentual de campo ao longo das linhas de ρ constante (ρ =15,18,19,19.5 cm), tomando como referência a distribuição de campo determinado para uma estrutura lisa sem deformação na seção anterior.

Através da análise dos resultados mostrados na Figura 4.11 pode-se inferir que os picos na região de deformação foram causados pelo aumento da energia refletida devido à presença da deformação e foram mais intensas nas regiões próximas a parede metálica externa. As oscilações menores encontradas na região entre a ranhura e o dielétrico são devidas às reflexões que existem entre estas regiões, conforme ilustradas na Figura 4.10.

A comparação dos picos de oscilação para as diversas freqüências mostra que a amplitude cresce continuamente com a freqüência, variando entre 1 e 10 % para os três casos. Este comportamento é devido ao aumento das dimensões elétrica com a freqüência, sendo aproximadamente proporcional à área da ranhura em comprimento de ondas ao quadrado.



Figura 4.10.: Reflexão de ondas na estrutura com deformação na superfície.













Figura 4.11.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5cm e z=6cm, , com dimensão de 1cmx1cm.

4.4.2. Variação da Posição da Ranhura

Para observar a variação de campo magnético em função da posição relativa da ranhura será considerada uma deformação de dimensão 1cmx1cm e o dispositivo excitado por uma onda TEM na freqüência de 2GHz.

Para comparação com os resultados mostrados na Figura 4.11, será considerada uma ranhura posicionada entre z=10 cm e z=11 cm. Como descrito na seção anterior, para aplicação do MEF a estrutura cilíndrica foi preenchida por uma grade com (24.401) nós e 48.000 elementos triangulares.



Figura 4.12.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=10cm e z=11cm, com dimensão de 1cmx1cm.

Para a freqüência de 2GHz, a Figura 4.12 mostra a variação de amplitude de campo magnético ao longo das linhas de ρ constante, onde observa-se uma diferença máxima de campo da ordem de 11,5% entre as posições de z=10 cm e z=11 cm e próximo da parede externa (ρ =19.5cm). A observação dos resultados mostrados na Figura 4.12 para uma ranhura mais próxima da porta de entrada indica que as perturbações máximas são semelhantes e se iniciam na região abaixo da ranhura.

Entretanto, se compararmos com os resultados mostrados na Figura 4.11 (c), observamos que à medida que a perturbação na parede externa se afasta da porta

de entrada, fica evidente a presença de ondas refletidas na ranhura que se somam as reflexões no disco dielétrico, gerando oscilações com amplitudes maiores que as observadas entre a ranhura e o disco, como mostrado na Figura 4.12.

4.4.3. Variação do Tamanho da Deformação

Para analisar a relação entre as dimensões da ranhura e a variação de campo para o campo magnético, vamos considerar ranhuras com mesma largura e diferentes profundidades. Para esta primeira análise, a posição da ranhura ficará entre z=5 cm e z=6cm., com 1 cm de largura.

A grade a ser utilizada na determinação dos campos é idêntica à utilizada anteriormente, exceto na região no interior da ranhura. Para as freqüências 0.5, 1.0 e 2,0 GHz, as Figuras 4.13-15 apresentam as diferenças ao longo de linhas de ρ constante.

Para observar os efeitos do alargamento da ranhura, a Figura 4.16 mostra as diferenças obtidas para ondas na freqüência de 2 GHz e para uma ranhura de 2 cm x 1 cm.



(a) 0,4 x 1,0 cm









Figura 4.13.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5 cm e z=6cm, para freqüência 0,5GHz.











Figura 4.14.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5 cm e z=6cm, para freqüência 1,0 GHz..



(a) 0,4 x 1,0 cm









Figura 4.15.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5cm e z=6cm, para freqüência 2,0 GHz .



Figura 4.16.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5cm e z=6cm, para freqüência de 2,0 GHz e dimensão 2,0 x 1,0 cm.

Para a freqüência de 0,5 GHz, a Figura 4.13 (a-c) mostra que as perturbações nos campos não são significamente alteradas pelas dimensões das corrugações e, diferente do observado nas outras freqüências, em nenhum caso apareceu um pico nítido na região da deformação, entre z=5cm e z=6cm. À medida que a freqüência aumenta, os picos de perturbação sob a região da ranhura aumentam com amplitude proporcional a área das ranhuras em comprimentos de ondas, como mostram os resultados nas Figura 4.14 e Figura 4.17 para as freqüências de 1 e 2 GHz. Além disto, devido ao comprimento de onda menor do que para a freqüência de 0.5, as oscilações são mais bem definidas e concentradas.

4.4.4. Conclusões

A Tabela 4.2 agrupa os picos de variação máxima das figuras apresentadas anteriormente. Diversos tamanhos de ranhuras foram analisados em diferentes posições do duto. Pode-se observar que os picos aumentam o valor da amplitude com o aumento da freqüência, pois dessa forma as dimensões elétricas (em comprimento de onda) das ranhuras ficam maiores. Pode-se observar também que a amplitude das variações é, aproximadamente, proporcional a área da ranhura em comprimentos de ondas, ou seja, o aumento na freqüência do sinal de observação resulta no aumenta da variação ao quadrado. Assim, a escolha do sinal de observação dependerá das dimensões das deformações que desejam ser observadas e da sensibilidade do equipamento de medida.

Dimensão da deformação (comprimento x largura)	F=0.5GHz	f=1.0GHz	f=2.0GHz
(2.0 x 1.0) em z=12cm	2.0%	7.5%	18.3%
(1.0 x 1.0) em z=10cm	1.42%	3.3%	11.5%
(2.0 x 1.0) em z=5cm	2.75%	4.7%	12.2%
(1.0 x 1.0) em z=5cm	1.3%	2.3%	10%
(0.5 x 1.0) em z=5cm	0.8%	1.35%	4.7%
(0.4 x 1.0) em z=5cm	1.3%	1.05%	5.5%

Tabela 4.2.: Valores dos picos para duto com alimentação Tipo I.

4.5. Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo II e Sem Deformações na Superfície

Nesta seção será realizado o estudo dos campos magnéticos num duto cilíndrico excitados por uma alimentação do Tipo II, onde uma diferença de potencial V é aplicada entre o cilindro externo e um disco metálico colocado no centro do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 4.17. Este modelo de alimentação corresponde a uma aproximação da possível forma de excitação do dispositivo de inspeção do duto de petróleo. Novamente, os campos gerados em paredes lisas serão utilizados como referência para o estudo de modelos com ranhuras na parede apresentados nas seções seguintes.

A fonte de corrente magnética utilizada para gerar uma diferença de potencial V é inversamente proporcional ao aumento da coordenada ρ , isto é, $M_{\rho} = \frac{1}{\rho}$. Logo, a amplitude dos campos na parede do cilindro interno $(\rho = 15cm)$ deverá ser maior que na parede do cilindro externo $(\rho = 20cm)$.

Assim como foi feito para os dutos com alimentação do Tipo I, a distribuição de campo eletromagnético será calculada em uma estrutura metálica

coaxial circularmente simétrica em torno do eixo longitudinal coincidente com o eixo z das coordenadas. Entre as paredes metálicas existe ar que é caracterizado pela permissividade e permeabilidade constantes (ε_0 , μ_0). Um dielétrico de 2 cm de espessura com permissividade elétrica relativa igual a 3 ($\varepsilon_R = 3$) foi colocado entre as posições z=21*cm* e z=23*cm*.



Figura 4.17.: Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo II.

Assim como foi mostrado no duto excitado por uma alimentação do Tipo I, a estrutura cilíndrica foi preenchida por 24.381 nós distribuídos uniformemente por toda a seção retangular do duto (5*cm* de largura por 23*cm* de comprimento). Foram utilizados 48.000 elementos triangulares para a aplicação do MEF, isto é, a mesma malha foi utilizada para os dutos excitados pelos dois tipos de alimentação.

Os campos magnéticos obtidos através da aplicação do método (MEF) são mostrados na Figura 4.18 ao longo das linhas $\rho = 15, 18, 19 \ e \ 19.5 \ cm$.

Como observado anteriormente, a presença do dielétrico produz onda estacionária, que pode ser percebida na oscilação da amplitude dos campos ao

longo das linhas de ρ constante. A Tabela 4.3 mostra que a porcentagem de onda refletida é em média 26% da onda incidente, valor semelhante ao que foi encontrado para a alimentação do Tipo I (27%), sendo pouco afetada pela mudança do tipo de alimentação.

	$\rho = 15cm$	$\rho = 18cm$	$\rho = 19cm$	$\rho = 19,5cm$
Amplitude da	0.003775	0.003135	0 002975	0 00295
Onda Incidente	0.000770	0.000 100	0.002370	0.00250
Amplitude da	0.000975	0.000865	0.000775	0.00075
Onda Refletida	0.000970	0.0000000	0.000772	0.00070
Coeficiente de	25.82	27 59	26.05	25.42
Reflexão (%)	20.02	_,,	20.00	20.12

Tabela 4.3.: Amplitudes das ondas incidentes e refletidas.

Apesar da distribuição de campo ser próxima a encontrada para a alimentação do Tipo I, a presença da fonte próxima a parede externa, entre esta e o disco metálico, faz com que os campos nesta região sejam mais intensos, como pode ser observado na Figura 4.18 para as curvas de $\rho = 19cm$ e $\rho = 19,5cm$, concentrados na região próxima a z=0cm.



Figura 4.18.: Campo Magnético de um duto sem deformações na superfície e alimentação Tipo II para freqüência de 1 GHz.

4.6. Estrutura Cilíndrica Com Alimentação Tipo II e Com Deformação na Superfície

Assim como na Seção 4.4, para examinar as variações de campo em função das perturbações na parede externa da tubulação, será utilizada, aqui, uma deformação na parede metálica externa da estrutura coaxial. Esta deformação corresponde a uma ranhura retangular de 1cm de comprimento e 1cm de profundidade e está colocada entre z=5cm e z=6cm, como indicado na Figura 4.19.

Novamente a alimentação do Tipo II é aplicada, existindo uma diferença de potencial V (correspondente a fonte de corrente magnética $M_{\rho} = \frac{1}{\rho}$) entre os cilindros externo e interno da estrutura, em z=0cm. Entre as paredes metálicas continua existindo ar (ε_0, μ_0) e o mesmo dielétrico com permissividade elétrica relativa igual a 3 ($\varepsilon_R = 3$) entre as posições z=21*cm* e z=23*cm* é utilizado.



Figura 4.19 - Estrutura cilíndrica com alimentação Tipo II.

Assim como na Seção 4.4, para a análise da distribuição de campo produzido pela alimentação do Tipo II foram utilizados 48000 elementos triangulares na aplicação do MEF, havendo uma densidade maior de nós na região da ranhura para que os modos superiores excitados sejam adequadamente representados.

As Figura 4.20 e Figura 4.21 mostram o campo magnético para deformações localizadas entre as posições z=5cm e z=6cm e entre z=10cm e z=11cm, respectivamente. A freqüência utilizada foi de 1GHz e são difíceis de se observar as diferenças entre as curva da Figura 4.20 e as curvas mostradas na Figura 4.18 para o duto sem deformações na superfície.



Figura 4.20.: Campo Magnético em um duto com alimentação Tipo II e com deformação na superfície para freqüência de 1GHz.

A Figura 4.21 que apresenta uma deformação entre as posições z=10cm e z=11cm possui picos que alcançam valores ligeiramente maiores que as curvas da Figura 4.20 (deformação entre z=5cm e z=6cm).



Figura 4.21.: Campo Magnético em um duto com alimentação Tipo II e com deformação na superfície para freqüência de 1GHz.

Outro modo de observar a presença dos modos superiores (modos TM) no dispositivo seria comparar a distribuição do campo com a que seria produzida pelo modo TEM. Isto poderia ser realizado multiplicando-se a distribuição por ρ . A presença exclusiva do modo fundamental TEM produziria uma distribuição constante e desvios desta constante indicariam a presença de modos superiores. As Figura 4.22 e Figura 4.26 mostram os valores do campo magnético multiplicado por ρ em um conjunto de seções ortogonais ao eixo z, considerando um duto com deformação entre z=5cm e z=6cm e um dielétrico entre z=21cm e z=23cm.

Como mostrado na Figura 4.22 para a seção z=0, entre ρ =15 cm e ρ =17 cm, a distribuição é próxima do modo TEM, divergindo deste na medida em que se aproxima da parede externa e indicando a presença de modos superiores na região próxima à fonte de corrente magnética e crescendo junto à parede externa. Para as seções em z=5 cm e z=6 cm e mostradas em Figura 4.23 e Figura 4.24, respectivamente, as curvas não constantes indicam a presença de modos superiores ao longo de toda seção. Para as seções em z=21 cm e z=23 cm e mostradas na Figura 4.25 e Figura 4.26, respectivamente, as curvas constantes



Figura 4.22.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo da linha constante de z=0cm para corrugação entre z=5 e 6cm e freqüência de 1GHz.



Figura 4.23.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de z=5cm para corrugação entre z=5 e 6cm e freqüência de 1GHz.



Figura 4.24.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de z=6cm para corrugação entre z=5 e 6cm e freqüência de 1GHz.



Figura 4.25.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de z=21cm para corrugação entre z=5 e 6cm e freqüência de 1GHz.



Figura 4.26.: Campo Magnético multiplicado por ρ ao longo de linhas bem próximas de z=23cm para corrugação entre z=5 e 6cm e freqüência de 1GHz.

Assim como na Seção 4.4, a análise do campo magnético excitado no interior do duto será dividida em três partes, que serão apresentadas nas seções a seguir.

4.6.1. Variação da Freqüência de Excitação do Duto

De modo similar ao apresentado na seção 4.4.1, o estudo do comportamento da distribuição de campo em função da freqüência da excitação será feito considerando-se as seguintes freqüências: 0.5GHz, 1GHz e 2GHz. A deformação utilizada possui 1cm de comprimento por 1cm de largura e está localizada entre as posições z=5cm e z=6cm do duto.

Para ilustrar as diferenças de campo magnético observados na região de interesse devido à presença da deformação na parede, a Figura 4.27 mostra a variação percentual de campo ao longo das linhas de ρ constante ($\rho = 15, 18, 19 \ e \ 19.5 \ cm$), obtida da comparação da distribuição de campo em uma estrutura lisa sem deformação.











Figura 4.27.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5cm e z=6cm, com profundidade de 1cm.

A Figura 4.27 mostra que para a freqüência de 0.5GHz o pico de variação máxima ocorre no início do duto (z = 0cm), próximo a parede externa ($\rho = 19.5cm$). Para a freqüência de 1GHz, os campos apresentam um pico de variação máxima de aproximadamente 2.4% sendo localizado entre a fonte e a corrugação e distribuído uniformemente ao longo da seção. Para a freqüência de 2GHz, o pico é de aproximadamente 12%, localizado na região da deformação, entre z=5cm e z=6cm, sendo mais intenso na região próxima à parede externa, indicando que os modos de ordem superior excitados estão juntos a perturbação. Como observado anteriormente, para uma mesma corrugação, a amplitude das variações cresce com a freqüência.

Pode-se também observar que com o aumento da freqüência aumentam as discrepâncias na região entre o dielétrico e a ranhura devido às reflexões múltiplas produzidas por eles. Além disto, pela observação das Figura 4.27 (a) e (c), o aumento da freqüência permite separar os efeitos causados pelos modos superiores sob a corrugação, gerados pela perturbação na parede, e pelos modos superiores gerados pela presença da fonte em z=0cm.

4.6.2. Variação da Posição da Ranhura

Para observar a variação de campo magnético em função da posição relativa da ranhura será considerada uma deformação de dimensão 1cmx1cm e uma freqüência de excitação de 2GHz.

Para se fazer o cálculo do campo magnético para a situação em que a deformação se localiza entre z=10cm e z=11cm, a estrutura cilíndrica foi preenchida pela mesma grade de elementos utilizada na seção 4.4.2 (alimentação Tipo I).



Figura 4.28.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5cm e z=6cm, com dimensão de 1cmx1cm e freqüência de 2GHz.



Figura 4.29.: Pico Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=10cm e z=11cm, com dimensão de 1cmx1cm e freqüência de 2GHz.

Com uma freqüência de 2GHz, a Figura 4.28 mostra uma variação de campo da ordem de 12% entre as posições de z=5cm e z=6cm (região da ranhura) e próximo da parede externa (ρ =19,5cm). Comparando-se com o caso da alimentação Tipo I, as formas de onda ficaram bem parecidas, sendo que na excitação de Tipo I a amplitude foi ligeiramente menor (10%).

A Figura 4.29 mostra um pico de variação máxima de aproximadamente 11.2%, entre z=5cm e z=10cm, com intensidade máxima próxima a parede

interna. Outros picos de intensidade um pouco menor aparecem no gráfico, mostrando que ondas refletidas de amplitudes significativas aparecem neste caso. Os resultados indicam um comportamento semelhante ao observado para a alimentação do Tipo I.

4.6.3. Variação do Tamanho da Deformação

Para analisar o efeito da variação do tamanho da deformação para o campo magnético, a freqüência será mantida, primeiramente, em 0.5GHz e a posição da ranhura ficará entre z=5cm e z=6cm. A seguir serão apresentados os gráficos de campos magnéticos para freqüências de 1.0GHz e 2.0GHz, variando-se, em cada caso, apenas o tamanho da deformação e mantendo-se a ranhura entre z=5cm e z=6cm. Nesse estudo serão consideradas deformações com dimensões de 0.4, 0.5 e 1.0cm de comprimento e 1.0cm de largura.

Para a freqüência de 0.5GHz, a Figura 4.30 mostra que os picos de variação máxima são pequenos e ocorrem no início do duto (z = 0cm), próximos a parede externa ($\rho = 19.5cm$). Nesses casos, pode-se dizer que a dimensão elétrica da ranhura é a menor dos três casos e as perturbações mais intensas ocorrem junto à fonte.

Para a freqüência de 1GHz, a Figura 4.31 ainda mostra valores de pico de variação entre 1.1% à 2.5%. Pode-se observar que os picos podem ser mais facilmente identificados na alimentação do Tipo I, como pode ser visto na Figura 4.14.

Para a freqüência de 2GHz, os dados da Figura 4.32 permitem identificar mais claramente as variações devido a fonte e a corrugação, havendo dois picos separados. Isto se deve à diminuição do comprimento de onda que permite separar os ciclos de oscilação e ao aumento das dimensões elétricas da corrugação. Podese observar que a alimentação Tipo I possui formas de onda parecidas, como pode ser visto na Figura 4.15.



(a) 0,4 x 1,0 cm









Figura 4.30.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5 cm e z=6cm, para freqüência 0,5GHz.



(a) 0,4 x 1,0 cm









Figura 4.31.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5 cm e z=6cm, para freqüência 1GHz.



(a) 0,5 x 1,0 cm





Figura 4.32.: Diferença percentual entre os módulos do campo magnético com e sem deformação. Corrugação entre z=5 cm e z=6cm, para freqüência 2GHz.

4.6.4. Conclusões

A Tabela 4.4 agrupa os picos de variação máxima das figuras apresentadas anteriormente. As conclusões dessa seção são bem parecidas com as da alimentação do Tipo I. Pode-se observar que aqui os picos também aumentam o valor da amplitude com o aumento da freqüência e que a amplitude das variações é, aproximadamente, proporcional a área da ranhura em comprimentos de ondas.

Dimensão da deformação (comprimento x largura)	f=0.5GHz	f=1.0GHz	f=2.0GHz
(2.0 x 1.0) em z=12cm	3.3%	15%	25%
(1.0 x 1.0) em z=10cm	2.9%	5.7%	11.2%
(1.0 x 1.0) em z=5cm	3.5%	2.4%	12%
(0.5 x 1.0) em z=5cm	2.3%	1.5%	6%
(0.4 x 1.0) em z=5cm	1.78%	1.1%	-

Tabela 4.4.: Valores dos picos para duto com alimentação Tipo II.