



Lucas Monteiro Martinho

**Aprimoramento da geração unidirecional de
ondas ultrassônicas do tipo SH com
transdutores acústicos eletromagnéticos do tipo
ímãs permanentes periódicos com separação
lateral e múltiplas fileiras de ímãs**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alan Conci Kubrusly

Rio de Janeiro
Setembro de 2022



Lucas Monteiro Martinho

Aprimoramento da geração unidirecional de ondas ultrassônicas do tipo SH com transdutores acústicos eletromagnéticos do tipo ímãs permanentes periódicos com separação lateral e múltiplas fileiras de ímãs

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Alan Conci Kubrusly

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Thomas Gabriel Rosauero Clarke

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Guilherme Simon da Rosa

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de Setembro de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Lucas Monteiro Martinho

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio - em 2020.

Ficha Catalográfica

Monteiro Martinho, Lucas

Aprimoramento da geração unidirecional de ondas ultrasônicas do tipo SH com transdutores acústicos eletromagnéticos do tipo ímãs permanentes periódicos com separação lateral e múltiplas fileiras de ímãs / Lucas Monteiro Martinho; orientador: Alan Conci Kubrusly. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2022.

v., 88 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Eletromagnetismo Aplicado – Teses. 3. Transdutores Acústicos Eletromagnéticos;. 4. Geração Unidirecional;. 5. Ondas Guiadas de Cisalhamento Horizontal;. 6. Fontes Lineares;. 7. Diagrama de Radiação.. I. Conci Kubrusly, Alan. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 620.11

Agradecimentos

Primeiro, agradeço ao meu orientador Alan Kubrusly pelo tempo, paciência, apoio e ensinamentos em todos esses últimos anos em que trabalhamos juntos.

Agradeço à minha família, em especial meus pais e meu irmão, por todo o amor, carinho e dedicação a mim destinados. Espero que esse trabalho represente tudo que me deram ao longo da minha vida.

Agradeço aos meus amigos, pelo incessante apoio em forma de conversas, conselhos e risadas.

Agradeço ao CPTI e sua equipe por todo o apoio, ensinamentos e suporte técnico ao longo desses anos. Em especial, ao João, Iury, Carlos, Raphael e Deivyd, por todas as conversas e imprescindível ajuda durante os experimentos. Sem eles, esse trabalho não seria realizado.

Por último, gostaria de agradecer a PUC-Rio, pela oportunidade dada em me tornar mestre em ciências em Engenharia Elétrica, e às instituições CAPES e FAPERJ pelas bolsas de pesquisa Código de Financiamento 001 e Mestrado Nota 10.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Monteiro Martinho, Lucas; Conci Kubrusly, Alan. **Aprimoramento da geração unidirecional de ondas ultrassônicas do tipo SH com transdutores acústicos eletromagnéticos do tipo ímãs permanentes periódicos com separação lateral e múltiplas fileiras de ímãs**. Rio de Janeiro, 2022. 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ondas ultrassônicas do tipo SH (do inglês, shear horizontal), ou de cisalhamento horizontal são úteis no campo de ensaios não-destrutivos. Essas podem ser geradas, em meios metálicos, por transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) que utilizam um arranjo de ímãs permanentes periódicos (PPM), chamados de EMATs PPM. Tais dispositivos em sua forma convencional, entretanto, geram ondas ultrassônicas bidirecionalmente, ou seja, para frente e para trás. Essa característica é geralmente indesejada. Recentemente, foi proposto um EMAT tipo PPM duplo com separação lateral que gera ondas nominalmente em uma única direção. Entretanto, seu diagrama de radiação revela lóbulos traseiros laterais. Esta dissertação tem como objetivo aprimorar o supracitado projeto através de seus parâmetros de construção, mais especificamente, o número de fileiras de ímãs permanentes do arranjo PPM e a separação lateral entre as mesmas. Foi desenvolvido um modelo analítico, baseado em linhas de fontes lineares, que considera a projeção de cada espira como uma fonte harmônica independente, para cálculo do campo ultrassônico gerado por EMATs PPM, tanto os do tipo PPM duplo, quanto o convencional. Com isso, foi possível obter o diagrama de radiação teórico dos dispositivos, de forma a analisar como os seus parâmetros de construção interferem em sua unidirecionalidade. Utilizou-se três tecnologias distintas de bobinas, a saber, bobinas fabricadas manualmente, bobinas fabricadas a partir de placas de circuito impresso (PCB) flexível de poliamida e PCB flexível de poliéster. Os arranjos PPM duplos foram colocados sobre moldes impressos em impressora 3D. Realizou-se testes experimentais em uma placa de alumínio 1.5 mm de espessura, com EMAT PPM comercial utilizado como receptor, em diversos ângulos, com o objetivo de calcular o diagrama de radiação experimental do EMAT PPM duplo. Ao todo foram montadas 44 unidades quando combinadas todas as tecnologias de fabricação de bobina, com separação lateral de 1 mm a 4 mm e 1 a 4 de fileiras de ímãs. Resultados experimentais e teóricos mostraram boa concordância. Foi observado que tanto aumentar o número de fileiras de ímãs, quanto diminuir a sua separação lateral reduzem a intensidade dos lóbulos traseiros laterais. Resultados experimentais mostraram que, com a configuração de 4 fileiras de

ímãs, separados lateralmente por 1 mm e bobinas feitas a partir de PCB de poliamida, a intensidade dos lóbulos traseiros laterais foi reduzida em 8.6 dB, em relação à configuração original do PPM EMAT duplo . Sobre as tecnologias de bobina, pode-se concluir que o uso de PCBs flexíveis tornou possível obter menores separações laterais entre as fileiras de ímãs e simplificar o processo de construção do EMAT PPM duplo, com destaque para a bobina feita com PCB flexível de poliamida, que apresentou baixo erro médio entre medidas experimentais e simuladas, apresentando também o mais fácil processo de fabricação entre os três tipos de bobinas avaliados.

Palavras-chave

Transdutores Acústicos Eletromagnéticos; Geração Unidirecional; Ondas Guiadas de Cisalhamento Horizontal; Fontes Lineares; Diagrama de Radiação.

Abstract

Monteiro Martinho, Lucas; Conci Kubrusly, Alan (Advisor). **Enhancement of unidirectional generation of SH ultrasonic waves with side-shifted periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducers and multiple rows of magnets.**

Rio de Janeiro, 2022. 88p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Shear horizontal (SH) ultrasonic waves are useful in the non-destructive evaluation field. They can be generated, in metallic media, by electromagnetic acoustic transducers (EMAT) that use an array of periodic permanent magnets (PPM). PPM EMATs, in their conventional form, generate forward and backward traveling SH waves. This feature is generally undesired. Recently, a side-shifted dual-PPM EMAT has been proposed. This device generates waves predominantly in a single direction. However, its radiation pattern reveals backward side lobes. This thesis aims to improve the aforementioned design through its construction parameters, more specifically, the number of rows of magnets in the PPM array and the lateral separation between them. An analytical model, based on the line source method, which considers the wires projections as independent wave sources, was developed to calculate the ultrasonic field generated by PPM EMATs, either for the conventional one or the dual-PPM EMAT. Exploiting the developed model, it was possible to compute the theoretical radiation pattern of the device in order to better analyse how its construction parameters affect its unidirectionality. Three different coil technologies were used, namely hand-wound coils and coils made with flexible printed circuit boards (PCBs), either of polyamide or polyester material. The magnet arrays were mounted on 3D-printed molds to ensure their positioning. Experimental tests were carried out where the fabricated device was placed onto a 1.5 mm-thick aluminum plate, and a commercial PPM EMAT was used as a receiver, at different reception angles, in order to calculate the radiation pattern of the dual-PPM EMAT. Overall, 44 units, combining all coil technologies, were manufactured with lateral separation from 1 mm to 4 mm and 1 to 4 rows of magnets per PPM. Experiments and theoretical results presented good agreement. It was observed that either increasing the number of rows of magnets or decreasing their lateral separation reduced the intensity of the backward side lobes. When using the configuration of 4 rows of magnets and 1 mm side shift, fabricated with polyamide PCBs, results revealed that the intensity of the backward side lobes was reduced by 8.6 dB, when compared with the original configuration. Regarding the coil technologies, it can

be concluded that the use of flexible PCBs allowed one to obtain shorter lateral separations between rows of magnets and simplified the fabrication process of the dual-EMAT. Mainly, the polyamide-based flexible PCB coil presented low average error between experimental and simulated measurements and the easiest fabrication process among all three coil technologies tested.

Keywords

Electromagnetic Acoustic Transducers; Unidirectional Generation; Shear Horizontal Guided Waves; Line Sources; Radiation Diagram.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Objetivos	21
1.2	Estrutura da Dissertação	22
1.3	Contribuições	23
1.4	Publicações	23
2	Fundamento Teórico	25
2.1	Ondas Ultrassônicas Guiadas	25
2.1.1	Ondas de Cisalhamento Horizontal	26
2.2	Transdutores Acústicos Eletromagnéticos de Ímãs Permanentes Periódicos	27
2.3	Unidirecionalidade em PPM EMATs	30
2.3.1	Geração Unidirecional de Ondas	30
2.3.2	PPM EMATs Unidirecionais	31
2.3.2.1	<i>Dual-Linear Coil PPM EMAT</i>	32
2.3.2.2	<i>Side-Shifted PPM EMAT</i>	33
3	Modelo Analítico	37
3.1	Parametrizações Realizadas	38
3.1.1	Seleção do PPM	38
3.1.2	Seleção de Célula	39
3.1.3	Seleção de Espira	40
3.2	Cálculo do Campo	42
3.2.1	Campo Gerado por uma Única Espira	42
3.2.2	Campo Total do <i>Side-Shifted PPM EMAT</i>	44
3.3	Algoritmos para o uso do modelo analítico	46
3.3.1	Modelo Continuous Wave	46
3.3.2	Modelo Time Domain	47
4	Avaliação Experimental	50
4.1	Fabricação do <i>Side-Shifted PPM EMAT</i>	50
4.1.1	Bobinas	50
4.1.1.1	Bobinas Manuais	50
4.1.1.2	Bobinas em PCBs Flexíveis	51
4.1.2	Arranjo de Ímãs	54
4.2	Setup Experimental	55
5	Resultados	58
5.1	Resultados Preliminares - Validação do Modelo	58
5.2	Resultados das Novas Configurações do Side-Shifted PPM EMAT	63
5.2.1	$Q = 1$ Fileiras de Ímãs	63
5.2.2	$Q = 2$ Fileiras de Ímãs	66
5.2.3	$Q = 3$ Fileiras de Ímãs	67
5.2.4	$Q = 4$ Fileiras de Ímãs	69
5.3	Discussão dos Resultados	72

5.3.1	Comparação quantitativa com modelo teórico	72
5.3.2	Análise de Unidirecionalidade	74
5.3.3	Intensidade das ondas geradas na direção frontal	76
5.3.4	Análise Final dos Resultados	79
6	Conclusão	80
6.1	Trabalhos Futuros	81
	Bibliography	82

Lista de figuras

- Figura 2.1 Esquemático de uma placa metálica de espessura h com uma onda do tipo SH se propagando em x_1 , com polarização em x_3 . 26
- Figura 2.2 Guia de ondas utilizado na representação das superposição de ondas de corpo transversais usadas na análise de ondas guiadas SH. As setas indicam o sentido de propagação das ondas e os pontos com círculos centralizados representam a polarização da ondas. 26
- Figura 2.3 Parte real da velocidade de fase, c_p , dos modos de onda propagantes em uma placa de alumínio com $c_T = 3111$ m/s, em função do produto frequência-espessura. 27
- Figura 2.4 PPM EMAT bidirecional convencional. Os blocos vermelhos e azuis representam os polos norte e sul dos ímãs, respectivamente. As setas pontilhadas indicam a corrente injetada na bobina. As forças de Lorentz geradas são representados pelas setas verticais contínuas. As forças são polarizadas no direção do eixo z , gerando ondas SH que se propagam ao longo do eixo x , seja no sentido positivo ou negativo. O PPM EMAT é colocado no superfície de uma placa cuja espessura está no eixo y . O comprimento dos ímãs é L , a largura é w , o espaço longitudinal entre os ímãs é g e a separação lateral entre ímãs do mesmo arranjo é d . Assim, o período espacial, que é igual ao comprimento de onda nominal da onda gerada, é $\lambda = 2(L + g)$. 28
- Figura 2.5 Exemplo de um processo de seleção de modo de um dispositivo PPM EMAT com comprimento de onda nominal, $\lambda = 12$ mm (linha preta pontilhada). Ao operar em 259 kHz, ele excita somente o modo fundamental não dispersivo, SH₀. 30
- Figura 2.6 Interferência destrutiva (coluna da esquerda) e construtiva (coluna da direita) entre duas ondas do tipo *burst* senoidal com duração de 8 pulsos. 31
- Figura 2.7 Configuração do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*. O primeiro PPM é composto por ímãs azul e vermelho e bobina de cor cobre. O segundo PPM é composto por ímãs de cor laranja e ciano e sua bobina equivalente é cinza. Setas verticais azul e rosa representam as forças de Lorentz geradas pelo primeiro e segundo PPMs, respectivamente. O comprimento de cada ímã é L e a separação longitudinal entre ímãs é g . O comprimento de onda nominal do dispositivo é $\lambda = 4(L + g)$. 32

- Figura 2.8 Configuração do *Side-shifted PPM EMAT* original, com $Q = 2$ fileiras de ímãs por PPM. Blocos vermelhos e azuis representam os polos norte e sul magnéticos, respectivamente, do primeiro arranjo PPM enquanto os blocos magenta e ciano representam os polos norte e sul magnéticos, respectivamente, do segundo arranjo PPM. As setas pretas, à esquerda, são as correntes injetadas em cada bobina. L é o comprimento do ímã, w é a largura do ímã, g é o gap longitudinal entre ímãs do mesmo arranjo, D é a separação lateral entre as diferentes fileiras de ímãs, d é a separação lateral entre fileiras de ímãs do mesmo PPM e λ é comprimento de onda nominal do dispositivo. São apresentados também a distância radial r e o ângulo α para um ponto de interesse, marcado com um x . 34
- Figura 2.9 *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 1$ fileiras de ímãs por PPM com bobina convencional do tipo *racetrack*. 35
- Figura 2.10 *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 3$ fileiras de ímãs por PPM com bobina do tipo *multi-lap racetrack*. 36
- Figura 2.11 *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 4$ fileiras de ímãs por PPM com bobina do tipo *multi-lap racetrack*. 36
- Figura 3.1 Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar o conjunto PPM a ser trabalhado, envolvido pelo retângulo tracejado. Blocos vermelhos e azuis representam os ímãs de polos norte e sul, respectivamente, relacionados ao primeiro PPM enquanto blocos magenta e ciano representam os ímãs de polos sul e norte, respectivamente, relacionados ao segundo PPM. 38
- Figura 3.2 Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar a célula a ser calculada. 40
- Figura 3.3 Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar a espira a ser trabalhada. 41
- Figura 3.4 Representação esquemática da parametrização realizada ao escolher o diferencial de espira a ser integrado. 42
- Figura 3.5 Sinal de excitação utilizado no modelo *TD*, composto por um *burst* senoidal de 8 ciclos centrado em 259 kHz, nos domínios temporal (a) e de frequência (b). 48
- Figura 4.1 Bobina manual do tipo *multi-lap racetrack coil* com os fios já soldados aos conectores do tipo BNC. 51
- Figura 4.2 Modelo de bobina *multi-lap racetrack coil* que formarão o *Side-Shifted PPM EMAT*, desenvolvido para impressão em PCB. 52
- Figura 4.3 Fotografia das folhas impressas de poliéster (a) e poliamida (b) das bobinas com separação lateral $D = 2$ mm que já passaram pelo processo de soldagem *wire-up*. A região vermelha destacada representa a área que deve ser cortada durante o processo de montagem da bobina de poliéster. 53
- Figura 4.4 Bobinas em PCB flexível de poliéster (a) e poliamida (b) já montadas e soldadas aos conectores BNC. 54

- Figura 4.5 Modelo criado no programa OnShape para PPMs de configuração $D = 3$ mm e $Q = 2$ (a) e $Q = 3$ (b) fileiras de ímãs por PPM. 55
- Figura 4.6 Moldes preenchidos para PPMs de separação lateral $D = 3$ mm e número de fileiras de ímãs por PPM, $Q = 1$ (a), $Q = 2$ (b), $Q = 3$ (c) e $Q = 4$ (d). Faces pintadas representam uma polaridade, seja ela Norte ou Sul, enquanto faces cinzas representam a polaridade inversa. 55
- Figura 4.7 Representação esquemática do setup experimental. Dois sinais *burst* senoidais defasados de 90° são criados pelo gerador de sinais aleatórios e amplificados antes de serem aplicados no *Side-shifted PPM EMAT* (caixa vermelha) de forma a gerar ondas SH em uma placa de alumínio de 1.5 mm de espessura. Essas ondas são recebidas por um EMAT PPM comercial da Sonemat Ltd. O sinal recebido é amplificado antes de ser lido em um osciloscópio digital, onde sua forma de onda é transferida para um computador. 57
- Figura 4.8 Fotografia dos equipamentos e montagem utilizados em uma medição com o *Side-shifted PPM EMAT*. À esquerda, (1) é o gerador de sinais, (2) são os amplificadores de potência, (3) é o amplificador de recepção e (4) é o osciloscópio digital. À direita, os cabos de alimentação (a) se ligam à bobina de poliamida (b) com o dual-PPM (c) que é posicionado acima. As ondas transmitidas pela placa metálica são lidas pelo PPM EMAT receptor comercial (d). 57
- Figura 5.1 Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) de um PPM EMAT convencional, de $w = 20$ mm, $L = 10$ mm, $g = 1$ mm, $d = 1$ mm e $\lambda = 22$ mm. Símbolos verdes representam pontos experimentais e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW*. 59
- Figura 5.2 Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*. Símbolos verdes representam pontos experimentais, a linha tracejada vermelha é a simulação em elementos finitos e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW*. 60
- Figura 5.3 Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) de um *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $Q = 2$, $D = 3$ mm, $w = L = 5$ mm e $g = 1$ mm. Símbolos verdes representam pontos experimentais, a linha tracejada vermelha é a simulação em elementos finitos e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo analítico *CW*. 61
- Figura 5.4 Sinais experimentais (linhas azuis) e simulados (linhas vermelhas) através do modelo *TD* em $\alpha = 0^\circ$ (a), $\alpha = 140^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ (c). O sinal de grande amplitude para tempos menores que $60 \mu s$ é a interferência eletromagnética dos equipamentos. Esse não afeta as formas de onda de interesse, porque chega depois do sinal de interferência. 62

- Figura 5.5 Diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT*. A linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW* enquanto a vermelha foi obtida através do modelo *TD*, o qual considera a banda do sinal de excitação. 63
- Figura 5.6 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 64
- Figura 5.7 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 64
- Figura 5.8 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 65
- Figura 5.9 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 65
- Figura 5.10 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 66
- Figura 5.11 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 66
- Figura 5.12 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 67

- Figura 5.13 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 67
- Figura 5.14 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 68
- Figura 5.15 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 68
- Figura 5.16 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 69
- Figura 5.17 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 69
- Figura 5.18 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 70
- Figura 5.19 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 70
- Figura 5.20 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 71

- Figura 5.21 Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente. 71
- Figura 5.22 **RMSE** para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, Q , e da separação lateral entre fileiras, D . Cores mais claras representam valores maiores de **RMSE**, enquanto as cores mais escuras representam valores menores. 73
- Figura 5.23 Valores máximos dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente (símbolos) e numericamente através do modelo *TD* (curvas) para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para diferentes separações laterais entre fileiras, D . 75
- Figura 5.24 Amplitude normalizada em $\alpha = 0^\circ$, para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para diferentes separações laterais entre fileiras, D . 77
- Figura 5.25 Valores experimentais da amplitude normalizada em $\alpha = 0^\circ$, para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (linhas e símbolos pretos), de poliamida (linhas e símbolos laranjas) e poliéster (linhas e símbolos verde), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para separações laterais entre fileiras, $D = 1$ mm (a), $D = 2$ mm (b), $D = 3$ mm (c) e $D = 4$ mm (d). 78

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Parâmetros de construção do PPM EMAT convencional testado. λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, g é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e d é a separação lateral entre fileiras de ímãs do mesmo PPM.	58
Tabela 5.2	Parâmetros de construção do <i>Dual-Linear Coil PPM EMAT</i> . λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, G é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e d é a separação lateral entre fileiras de ímãs do mesmo PPM.	60
Tabela 5.3	Parâmetros de construção do <i>Side-Shifted PPM EMAT</i> original. λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, g é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e D é a separação lateral entre diferentes fileiras de ímãs.	60
Tabela 5.4	Raiz quadrada do erro médio, RMSE dos experimentos realizados para cada tecnologia de bobina do <i>Side-Shifted PPM EMAT</i> .	73
Tabela 5.5	Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o <i>Side-Shifted PPM EMAT</i> de bobina feita manualmente.	74
Tabela 5.6	Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o <i>Side-Shifted PPM EMAT</i> de bobina feita em PCB flexível de poliamida.	74
Tabela 5.7	Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o <i>Side-Shifted PPM EMAT</i> de bobina feita em PCB flexível de poliéster.	75

*Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende
o que ensina*

Cora Coralina, *O Professor*.

1

Introdução

Ensaaios não-destrutivos utilizando ondas ultrassônicas guiadas são objetos de estudo há anos [1–5]. Dentre as ondas guiadas em placas, existem duas famílias principais, as ondas de cisalhamento horizontal (SH) [4,6–8], e as ondas de Lamb [9,10]. As ondas SH apresentam vantagens, comparadas com as ondas de Lamb, tais como não produzirem perda de energia para líquidos não viscosos [11], poderem ser operadas em um único modo não dispersivo e apresentarem equações de dispersão simples [9]. Quando levado em consideração somente o modo cisalhante fundamental (SH0), esse produz sinais de interpretação mais simples porque é completamente não dispersivo. Além disso, o deslocamento de partículas do modo SH0 é uniforme ao longo da espessura do material, tornando, em baixa frequência, sua sensibilidade à defeitos independente de seu posicionamento ao longo da espessura [12,13].

Ondas SH podem ser geradas através de diferentes dispositivos, como transdutores piezoelétricos [14,15] e transdutores EMATs [11,16]. Geração de ondas SH com transdutores piezoelétricos é contudo, não convencional, necessitando de polarização especial ou mecanismos de conversão de modo [14,15,17]. Tanto EMATs magnetostrições [18] como EMATs com arranjos de ímãs permanentes periódicos (PPMs) [16] podem gerar ondas SH. Esse último apresenta vantagens no sentido de não precisar estar em contato com a superfície do meio analisado, ao contrário dos dispositivos piezoelétricos [19], e podem funcionar em meios não ferromagnéticos, uma vez que geram ondas utilizando as forças de Lorentz [16,20], ao contrário dos EMATs que agem por magnetostrição [18].

PPM EMATs convencionais, entretanto, geram ondas para frente e para trás, simultaneamente [16]. Essa característica pode ser indesejada ao inspecionar placas de tamanho reduzido, gerando ondas refletidas que podem se misturar e interferir com o sinal recebido de interesse [6,21]. Outro caso onde geração bidirecional pode ser indesejada é em dutos metálicos, porque as ondas que se propagam para trás podem circular o tubo e se misturar ao sinal de interesse na recepção, dificultando a análise das formas de onda recebidas [6].

Recentemente, houve pesquisas para desenvolver EMATs omnidirecionais. Zhang et al. desenvolveu EMATs que geram ondas SH utilizando bobinas em

forma de meio anel junto à ímãs de formato correspondente [22] e Wilcox desenvolveu EMATs que geram ondas de Lamb a partir de bobinas em espiral com o uso de um ímã circular [23]. Tal solução pode ser útil quando há interesse em encontrar defeitos pontuais em uma grande área de placa [24], caso seja garantida a inexistência de reflexões.

Pesquisas envolvendo EMATs com direcionalidade controlada também foram feitas por Liu et al. [25], usando transdutores magnetostriitivos, onde o ângulo de geração de ondas pode ser alterado. Foram observadas, contudo, ondas para mais de uma direção, o que pode se tornar indesejado em aplicações como inspeções de placas reduzidas e dutos, da mesma forma que PPM EMATs convencionais.

O campo de pesquisas envolvendo geração unidirecional de ondas ultrassônicas através do mecanismo de interferência destrutiva e construtiva de ondas, ao se posicionar duas fontes de onda separadas adequadamente e com sinais de excitação defasados apropriadamente, existe há anos. Em 1978, Toda e Shinoda [26] criaram um transdutor EMAT unidirecional de ondas de Lamb em placas piezoelétricas com um par de eletrodos separados longitudinalmente. Em 1998, Yamasaki et al. [27] utilizou um EMAT com duas bobinas para gerar ondas guiadas unidirecionais em fios de aço. Recentemente, esse mecanismo foi utilizado por Chen et al. [28] para ondas de Rayleigh utilizando EMATs com duas bobinas do tipo *meander-line coil* adequadamente posicionadas e com sinais de excitação adequados, de forma a obter geração unidirecional de ondas, de forma parecida com a utilizada nesse trabalho.

Yong-qian Li et al. [29] utilizou desse princípio para gerar ondas ultrassônicas de corpo do tipo cisalhante vertical (SV) em inspeção de defeitos em trilhos de trem através de ondas unidirecionais focalizadas. Huang et al. [30], por sua vez, utilizou dispositivos do tipo PPM EMATs de construção não convencional para geração de ondas SH unidirecionais focalizadas. Esses últimos trabalhos citados, entretanto, tiveram como objetivo a geração de ondas focalizadas, o que pode não ser de grande utilidade em aplicações de inspeções em grandes áreas ou distâncias de interesse, já que fora de seu ponto de focalização a intensidade da onda é consideravelmente reduzida. Portanto, um dispositivo tipo PPM EMAT que gere ondas primariamente em uma única direção, de forma não focalizada, seria de grande utilidade no campo de ensaios não destrutivos.

Nos dispositivos do tipo PPM EMAT convencionais, esse mecanismo de geração unidirecional não é de fácil aplicação, dado que a direção das forças geradas no material condutor é determinado pela da polarização dos ímãs sobre a bobina, não sendo possível associar o mesmo PPM a diferentes bobinas. A solução proposta por Kubrusly et al. [31, 32] foi combinar duas bobinas

com dois PPMs, efetivamente juntando dois dispositivos PPM EMATs em um único. Com essa estratégia, dois projetos de PPM EMATs duplos foram criados, o *Side-Shifted PPM EMAT* [31] e o *Dual-Linear Coil PPM EMAT* [32]. O primeiro é construído ao transladar lateralmente um arranjo PPM em relação ao outro junto de sua respectiva bobina tipo *racetrack*, produzindo assim duas fontes de forças com desalinhamento lateral. Como consequência, o *Side-Shifted PPM EMAT* construído produz lóbulos traseiros laterais, ou seja, foram geradas ondas que se propagassem para o semi-plano traseiro de amplitudes não negligenciáveis. O segundo dispositivo também foi feito com dois arranjos PPMs diferentes, entretanto, no *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, as bobinas foram enroladas em volta de cada ímã. Dessa forma, os PPMs não precisariam ser transladados lateralmente, assim sendo, o dispositivo não produz lóbulos traseiros laterais. Entretanto, de forma a acomodar todos os ímãs na mesma posição lateral, foi necessário aumentar o espaçamento entre os ímãs do mesmo arranjo, dobrando assim o comprimento de onda nominal do dispositivo. Com isso, a frequência de operação diminuiu, além do dispositivo tornar-se mais comprido.

Com base nos pontos acima, esta dissertação propõe aprimorar as características de radiação do dispositivo *Side-Shifted PPM EMAT* a partir de alterações nos seus parâmetros de construção. Em especial, na separação lateral entre diferentes arranjos de PPM e o número de fileiras de ímãs por PPM, com o objetivo de reduzir os lóbulos traseiros laterais, presentes na configuração original do *Side-Shifted PPM EMAT*.

Esse modelo tornou possível avaliar o diagrama de radiação de dispositivos *Side-Shifted PPM EMAT*. Em seguida, diversas configurações foram fabricadas e avaliadas com base na melhoria de sua unidirecionalidade e outros fatores como aumento de energia transmitida.

1.1

Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de transdutores *Side-Shifted PPM EMAT* com lóbulos traseiros laterais reduzidos, isso é, aumentando sua unidirecionalidade, quando comparados ao *Side-Shifted PPM EMAT* original [31]. Para isso, foi desenvolvido um modelo analítico capaz de simular diferentes construções de *Side-Shifted PPM EMAT* ideais.

1.2

Estrutura da Dissertação

O restante dessa dissertação está organizado da seguinte maneira. O capítulo 2 inicia apresentando a teoria básica de propagação de ondas ultrassônicas guiadas, em especial as de cisalhamento horizontal (SH). Posteriormente, é apresentado uma forma de gerar ondas SH através dos transdutores acústicos eletromagnéticos (EMATs) com ímãs permanentes periódicos (PPMs). Em seguida, o mesmo apresenta a base teórica por trás do princípio de geração de ondas unidirecionais. Seguido de diferentes formas de se gerar ondas unidirecionais a partir de dispositivos do tipo PPM EMAT. O dispositivo estudado nessa dissertação, o *Side-Shifted PPM EMAT*, é apresentado e tem seus diferentes parâmetros de configuração discutidos.

O capítulo 3 apresenta o modelo analítico desenvolvido para calcular o campo gerado por um dispositivo do tipo PPM EMAT, em especial o *Side-Shifted PPM EMAT*, a partir do modelo denominado *Line Source*. A seguir, o modelo analítico desenvolvido é aplicado em dois algoritmos diferentes. O primeiro, chamado de Modelo *Continuous Wave* é a aplicação direta do modelo analítico anteriormente citado em uma linguagem computacional. Esse é capaz de simular o campo harmônico na frequência de interesse gerado por um PPM EMAT em uma distância e ângulo determinados. Ao variar o ângulo de cálculo, é obtido o diagrama de radiação de um dispositivo do tipo PPM EMAT. O segundo modelo, chamado de Modelo *Time Domain*, é mais complexo, porque leva em conta o espectro de frequência dos sinais de duração finita (geralmente do tipo *burst* senoidal) utilizados como excitação em um dispositivo do tipo PPM EMAT. Esse modelo é capaz de simular as formas de onda geradas, em função do tempo, em uma distância, ângulo determinados. Ao variar esses parâmetros, pode-se obter o diagrama de radiação e a propagação das ondas geradas em função do tempo.

No capítulo 4, é apresentado o processo de construção do *Side-Shifted PPM EMAT*, começando com a fabricação e montagem dos três diferentes tipos de bobinas utilizadas, a saber, bobinas feitas manualmente e bobinas feitas em placas de circuito impresso de poliamida e poliéster, seguido da fabricação do molde utilizado para os arranjos de ímãs. A seguir são apresentados os equipamentos utilizados na montagem experimental realizada para realizar as medidas com os *Side-Shifted PPM EMAT* fabricados.

No capítulo 5, primeiramente, são apresentados os resultados numéricos preliminares com três diferentes dispositivos do tipo PPM EMAT, de forma a validar os modelos desenvolvidos. Após, são apresentados os resultados experimentais obtidos com todas as diferentes configurações de *Side-Shifted*

PPM EMAT fabricadas. Por último, os resultados são discutidos e comparados entre si e aos resultados obtidos nas simulações através do Modelo *Time Domain*.

Por fim, o capítulo 6 inicia com as considerações finais e conclusões da dissertação. Seguido de possíveis temas futuros que podem aprimorar a pesquisa realizada nesta dissertação.

1.3

Contribuições

As principais contribuições dessa dissertação são: (i) desenvolvimento de um algoritmo simples e robusto capaz de simular diferentes configurações de PPM EMATs; (ii) desenvolvimento de uma metodologia de fabricação e montagem de dispositivos do tipo *Side-Shifted PPM EMAT* com bobinas feitas em PCBs flexíveis. (iii) melhoria da geração unidirecional do *Side-Shifted PPM EMAT*; (iv) conclusão sobre a tecnologia de bobina mais adequada para o *Side-Shifted PPM EMAT*; (v) dois artigos acadêmicos foram escritos com base nessa pesquisa. O primeiro, trata do modelo analítico desenvolvido e tem como escopo o capítulo 3 dessa dissertação. O segundo, trata dos resultados experimentais, é apresentado principalmente na seção 5.2.

1.4

Publicações

A partir dos modelos desenvolvidos, um artigo foi publicado nos anais do congresso internacional *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium* (IUS 2021):

- **L. M. Martinho**, A. C. Kubrusly, L. Kang and S. Dixon, "Computation of the radiation pattern of unidirectional SH wave generated by dual-PPM EMATs," *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/IUS52206.2021.9593803.

Dos resultados experimentais, foi produzido e publicado na revista *IEEE Sensors Journal*, um artigo científico:

- **L. M. Martinho**, A. C. Kubrusly, L. Kang and S. Dixon, "Enhancement of the Unidirectional Radiation Pattern of Shear Horizontal Ultrasonic Waves Generated by Side-Shifted Periodic Permanent Magnets Electromagnetic Acoustic Transducers With Multiple Rows of Magnets," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 7637-7644, 15 April 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3156849.

Ambos encontram-se como anexo no Apêndice dessa dissertação.

Durante o mestrado, também foram produzidos dois trabalhos acadêmicos não relacionados ao tema dessa dissertação:

- **Martinho, Lucas M.**, Alan C. Kubrusly, Nicolás Pérez, and Jean Pierre von der Weid. 2021. "Strain Sensitivity Enhancement of Broadband Ultrasonic Signals in Plates Using Spectral Phase Filtering" *Applied Sciences* 11, no. 6: 2582. <https://doi.org/10.3390/app11062582>
- C. M. Nascimento, **L. M. Martinho** and A. C. Kubrusly, "Numerical investigation of the propagation characteristics of shear horizontal guided wave modes in coated pipes," 2021 IEEE UFFC Latin America Ultrasonics Symposium (LAUS), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/LAUS53676.2021.9639157.

2

Fundamento Teórico

Neste capítulo são apresentados os fundamentos sobre ondas ultrassônicas guiadas, em especial as ondas do tipo SH. Em seguida, são apresentados os dispositivos PPM EMATs, capazes de gerar ondas SH em materiais metálicos. Com isso, suas características principais de radiação são discutidas, de forma a introduzir o conceito de geração unidirecional de ondas, utilizado na construção de dois dispositivos PPM EMATs não convencionais, o *Dual-Linear Coil PPM EMAT* e o *Side-Shifted PPM EMAT*, esse último, tema central desta dissertação.

2.1

Ondas Ultrassônicas Guiadas

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas que se propagam em um meio, seja ele sólido ou fluido, com frequência superior à audível [33]. Em meios sólidos, as ondas de ultrassom podem ser divididas em ondas de corpo longitudinais (ondas P), quando sua direção de polarização é paralela à sua propagação, e ondas de corpo transversais (ondas S), quando a polarização é perpendicular à direção propagação [33, 34]. As ondas P e S se propagam no meio com velocidades distintas, c_L e c_T , respectivamente. Definidas pelas equações abaixo.

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad , \quad (2-1)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad , \quad (2-2)$$

onde ρ é a densidade do meio, λ é a primeira constante de Lamé e μ é a segunda constante de Lamé [34].

Dentre as ondas guiadas em placas planas, existem duas famílias, as ondas de Lamb, caracterizadas por possuírem polarização paralela ao plano da seção reta da placa e as ondas SH, que possuem polarização perpendicular ao plano da seção reta da placa e perpendicular à direção de propagação [9, 34]. Nesse trabalho, somente as ondas SH são consideradas.

2.1.1

Ondas de Cisalhamento Horizontal

Ondas de cisalhamento horizontal, ou ondas SH (do inglês *shear horizontal*), são ondas elásticas caracterizadas por apresentar vibração em um plano paralelo à superfície do material e, simultaneamente, perpendicular à direção de propagação [9, 34]. A Figura 2.1 apresenta esquematicamente a polarização e direção de propagação, k , de uma onda SH se propagando na direção x_1 , com vibração no eixo x_3 , em uma placa metálica com espessura h no eixo x_2 .

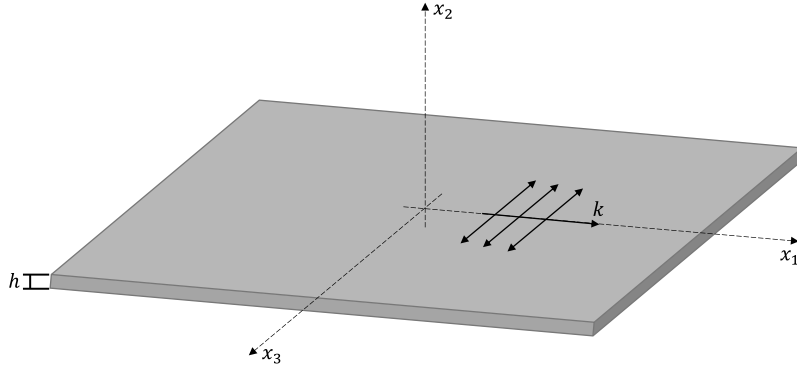


Figura 2.1: Esquemático de uma placa metálica de espessura h com uma onda do tipo SH se propagando em x_1 , com polarização em x_3 , adaptado de [9].

Ondas guiadas SH são geradas pela superposição de ondas S , paralelas à superfície, refletidas pelas superfícies de um meio finito de faces paralelas, ou seja, uma placa, atendendo à condição de contorno de tensão mecânica nula nas superfícies. Essa superposição de ondas é apresentada na Figura 2.2.

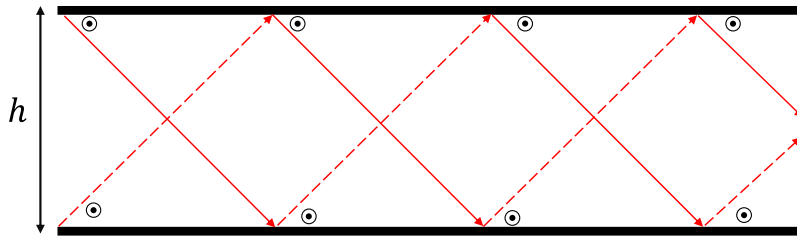


Figura 2.2: Guia de ondas utilizado na representação das superposição de ondas de corpo transversais usadas na análise de ondas guiadas SH. As setas indicam o sentido de propagação das ondas e os pontos com círculos centralizados representam a polarização das ondas.

As derivações das curvas de dispersão, equações de deformação e tensão das ondas SH podem ser encontradas em livros-texto, tal como [9]. A velocidade de fase, c_p é dada por

$$c_p = \frac{2c_T(fh)}{\sqrt{4(fh)^2 - n^2c_T^2}} \quad , \quad (2-3)$$

onde f é a frequência de operação, h é a espessura do guia de onda, c_T é a velocidade de corpo transversal no meio e n é a ordem do modo de onda estudado. Analisando (2-3), percebe-se que o modo fundamental, $n = 0$, apresenta velocidade de fase da onda SH constante e igual a $c_p = c_T$. Ou seja, o modo fundamental, chamado de SH0, é não dispersivo. As curvas de dispersão das ondas SH, para uma placa de alumínio com $c_T = 3111$ m/s, são apresentadas na Figura 2.3, em função do produto, frequência-espessura, fh

Ondas SH são úteis em ensaios não destrutivos porque essas não apresentam perda de energia para líquidos não viscosos e possuem relações simples de dispersão, como apresentado acima [7, 9]. Além disso, permitem a excitação de somente um modo não dispersivo [1, 35]. Essa característica pode ser ilustrada ao analisar a Figura 2.3, onde, para pontos de operação menores que 1 Mhzmm, somente o modo fundamental, SH0, se propaga, já que essa região está abaixo da frequência de corte dos modos de ordem maior (SH1 em diante). Outras ondas guiadas, como as de Lamb, por exemplo, possuem pelo menos dois modos propagantes [9, 23] e apresentam dispersão em todos os modos, o que pode complicar a interpretação de sinais, ocasionando em uma necessidade de aplicação de técnicas de pós-processamento [11, 36, 37].

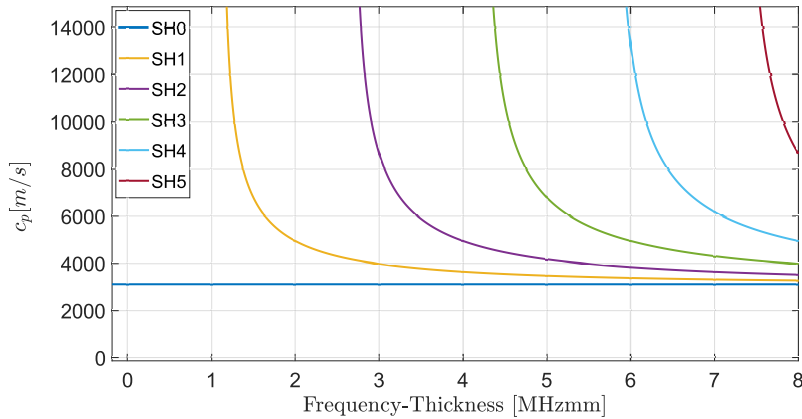


Figura 2.3: Parte real da velocidade de fase, c_p , dos modos de onda propagantes em uma placa de alumínio com $c_T = 3111$ m/s, em função do produto frequência-espessura.

2.2

Transdutores Acústicos Eletromagnéticos de Ímãs Permanentes Periódicos

Um dispositivo capaz de gerar ondas SH em placas metálicas é o transdutor acústico eletromagnético de ímãs permanentes periódicos (PPM EMAT). PPM EMATs são compostos por um arranjo de ímãs com polaridades alternadas, colocados sobre uma bobina do tipo *racetrack*. A Figura 2.4 apresenta esse arranjo de ímãs como quadrados de cores azul e vermelha, representando as

polaridades magnéticas dos ímãs enquanto a bobina é representada pelos fios de cor marrom.

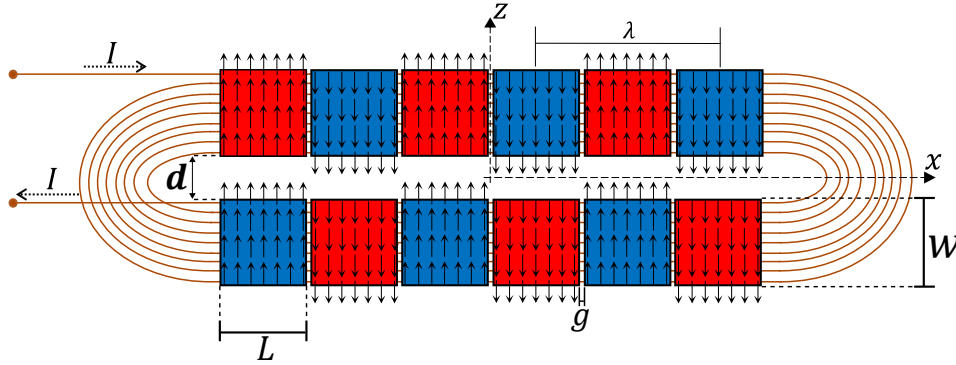


Figura 2.4: PPM EMAT bidirecional convencional, baseado em [38]. Os blocos vermelhos e azuis representam os polos norte e sul dos ímãs, respectivamente. As setas pontilhadas indicam a corrente injetada na bobina. As forças de Lorentz geradas são representados pelas setas verticais contínuas. As forças são polarizadas no direção do eixo z , gerando ondas SH que se propagam ao longo do eixo x , seja no sentido positivo ou negativo. O PPM EMAT é colocado no superfície de uma placa cuja espessura está no eixo y . O comprimento dos ímãs é L , a largura é w , o espaço longitudinal entre os ímãs é g e a separação lateral entre ímãs do mesmo arranjo é d . Assim, o período espacial, que é igual ao comprimento de onda nominal da onda gerada, é $\lambda = 2(L + g)$.

De forma geral, EMATs utilizam dois mecanismos para gerar ondas ultrassônicas, por magnetostricção [39] e pelo princípio de Lorentz [16, 20]. Nesse trabalho os experimentos serão realizados em uma placa de alumínio, que é um material não ferromagnético. Portanto, somente será discutida a geração de ondas ultrassônicas através da força de Lorentz.

Ao introduzir uma corrente elétrica, I , na bobina, induz-se uma densidade de corrente parasita, \mathbf{J} , com direção contrária a I , no material metálico [16]. Pode-se simplificar que essa corrente induzida age somente na superfície do material condutor devido ao efeito pelicular [1, 7, 16, 40]. A rigor, tanto a magnitude quanto a fase da corrente parasita variam com a profundidade do material, porém, como o comprimento de onda das ondas ultrassônicas é muito maior do que a profundidade de penetração dada pelo efeito pelicular, a simplificação acima é aceitável. A profundidade de penetração é dada por [23]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}\mu\omega\sigma}} \quad , \quad (2-4)$$

onde ω é a frequência angular, μ é a permeabilidade magnética do meio e σ a condutividade elétrica do meio [23, 41, 42]. Usando valores conhecidos para o alumínio em frequência de operação de 259 kHz ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$, $\sigma = 37 \cdot 10^6 \text{ Sm}^{-1}$), a profundidade de penetração, δ , é de aproximadamente 0.16 mm. Como os comprimentos de onda trabalhados são da ordem de 10 mm,

as simplificações citadas acima podem ser feitas. A densidade de corrente, J , ao interagir com o campo magnético estático, \mathbf{B} , criado pelo arranjo de ímãs, gera forças de Lorentz [16, 43] na superfície do meio condutor. Essas são dadas pelo produto vetorial entre a corrente induzida e o campo magnético:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2-5)$$

A força de Lorentz é representada pelas pequenas setas contínuas pretas sob os ímãs na Figura 2.4. O arranjo dos ímãs e bobina nos PPM EMATs é feito de forma que as forças de Lorentz sejam paralelas à superfície do meio, na direção do eixo z , e perpendiculares à direção de propagação, no eixo x , portanto, podem ser geradas ondas SH que se propagam em ambas as direções do eixo x , com máximos de transmissão ao longo do eixo. Observe que a separação entre ímãs, com comprimento L , de polaridades opostas determina o comprimento de onda, λ , para as ondas SH geradas pelo PPM EMAT. Ou seja,

$$\lambda = 2(L + g) \quad . \quad (2-6)$$

Os modos de onda SH gerados podem ser selecionados ao controlar o comprimento de onda nominal do PPM EMAT, e também a frequência da corrente induzida na bobina [6, 16].

Um exemplo da seleção de modos excitados por um PPM EMAT é dado na Figura 2.5, que mostra a velocidade de fase, c_P , dos quatro primeiros modos propagantes em uma placa de alumínio de 1.5 mm de espessura com velocidade de onda transversal $c_T = 3111$ m/s, em função da frequência. Um PPM EMAT de $\lambda = 12$ mm excita, idealmente, somente o modo fundamental, SH0, quando operado em uma frequência de 259 kHz. Se desejável fosse, o modo SH1 poderia ser excitado, ao trabalhar em uma frequência pouco acima de 1 MHz.

Em operações reais, entretanto, essa linha de transdução (linha preta tracejada), é um setor angular com abertura dependente da distribuição espacial de forças imposta na construção do arranjo PPM [35, 44]. Além disso, como sinais de excitação de duração finita não ocupam somente uma única frequência sim, uma banda de frequências, a região de operação de um PPM EMAT ocuparia mais de uma frequência [6, 44]. A caracterização em frequência dos sinais de excitação é explorada na seção 3.3.2. Nesse trabalho, como forma de simplificar a análise das ondas geradas, somente utiliza-se o modo SH0 excitado no ponto de operação apresentado acima.

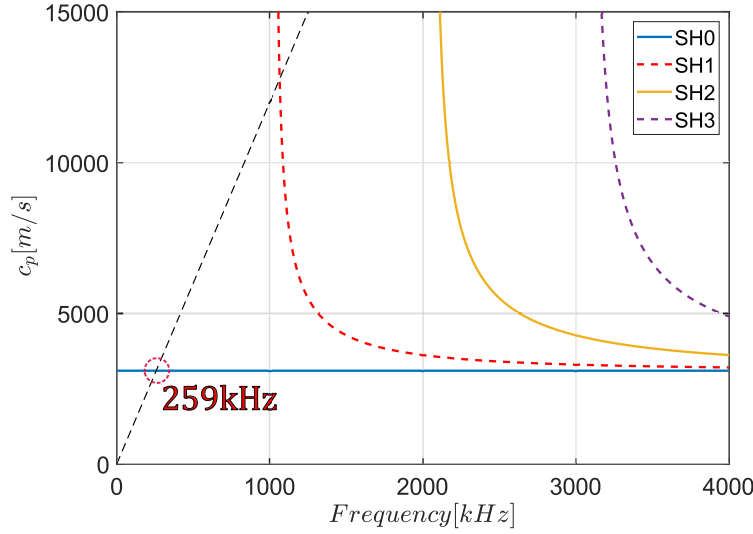


Figura 2.5: Exemplo de um processo de seleção de modo de um dispositivo PPM EMAT com comprimento de onda nominal, $\lambda = 12$ mm (linha preta pontilhada). Ao operar em 259 kHz, ele excita somente o modo fundamental não dispersivo, SH0.

2.3

Unidirecionalidade em PPM EMATs

PPM EMATs têm como característica de radiação, uma geração bidirecional de ondas ao longo do eixo longitudinal x . Isso pode ser inconveniente em aplicações onde as ondas podem ser refletidas [6, 21] ou, em casos de dutos metálicos, a onda que se propaga para trás chegar ao transdutor receptor através de um caminho inverso, se misturando à onda frontal propagante [6].

Um mecanismo de geração unidirecional de ondas, portanto, é desejável. Nessa seção, é apresentada a teoria do princípio de geração unidirecional, através de duas fontes de ondas genéricas [26, 32, 45]. Em seguida, são apresentados dois projetos de dispositivos do tipo PPM EMAT não-convencionais que utilizam desse mecanismo para gerar ondas ultrassônicas do tipo SH, com destaque ao dispositivo *Side-Shifted PPM EMAT*, objeto central desta dissertação.

2.3.1

Geração Unidirecional de Ondas

Considere duas fontes de ondas ultrassônicas genéricas independentes, A e B , separadas por uma distância Δx , ambas sendo excitadas por um sinal de uma única frequência, f , com frequência angular $\omega = 2\pi f$. Nesse exemplo unidimensional, cada fonte gera ondas igualmente nas duas direções do eixo x . Ao aplicar um atraso temporal, Δt , no sinal da segunda fonte, as ondas geradas por ambas as fontes, ao longo do eixo x , são dadas por:

$$u_A = e^{j(\omega t \mp \kappa x)} \quad , \quad (2-7)$$

$$u_B = e^{j(\omega(t+\Delta t) \mp \kappa(x+\Delta x))} \quad , \quad (2-8)$$

onde $\kappa = 2\pi/\lambda$ é o número de onda. O símbolo \mp representa as ondas com propagação na direção $+x$ e $-x$ para os sinais de $-$ e $+$, respectivamente. Como o objetivo é impor que as ondas se interfiram construtivamente na direção $+x$ e destrutivamente na direção $-x$, podemos definir a distância entre as fontes como $\Delta x = \pi/2\kappa$, igual a um quarto de comprimento de onda, e o atraso temporal como $\Delta t = \pi/2\omega$ ou 90° , que representa um quarto de período. Com isso, os somatórios das ondas para $+x$, u_+ , e para $-x$, u_- , são:

$$u_+ = e^{j(\omega t - \kappa x)} + e^{j(\omega(t + \frac{\pi}{2\omega}) - \kappa(x + \frac{\pi}{2\kappa}))} = 2e^{j(\omega t - \kappa x)} \quad , \quad (2-9)$$

$$u_- = e^{j(\omega t + \kappa x)} + e^{j(\omega(t + \frac{\pi}{2\omega}) + \kappa(x + \frac{\pi}{2\kappa}))} = e^{j(\omega t + \kappa x)} + e^{j(\omega t + \kappa x)} e^{j\pi} = 0 \quad , \quad (2-10)$$

portanto, obtém-se assim uma geração unidirecional de ondas. Esse princípio funciona idealmente para qualquer tipo de onda.

É comum, contudo que não se utilizem sinais com uma única componente em frequência, e sim sinais de duração finita, tais como sinais do tipo *burst* senoidal. Nesse caso, as interferências quase destrutiva e construtiva possuem o padrão exibido na Figura 2.6.

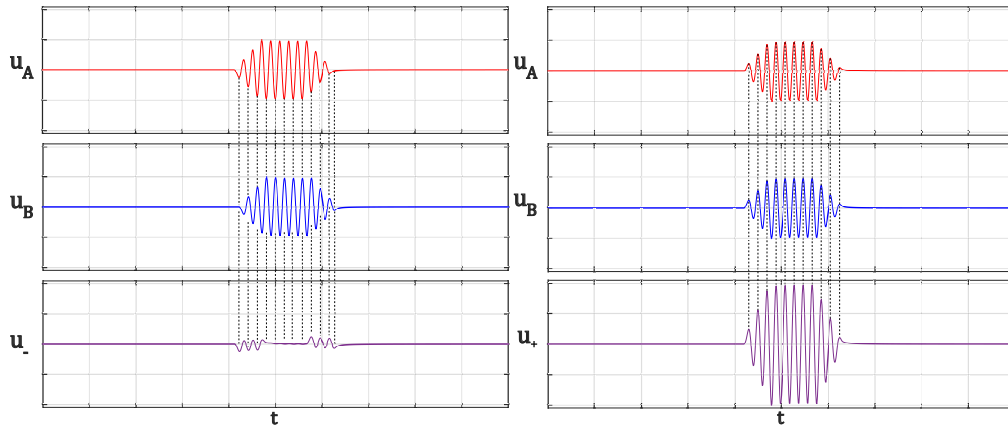


Figura 2.6: Interferência destrutiva (coluna da esquerda) e construtiva (coluna da direita) entre duas ondas do tipo *burst* senoidal com duração de 8 pulsos.

2.3.2

PPM EMATs Unidirecionais

PPM EMATs convencionais não permitem o uso dos mecanismos de interferência apresentados acima, porque a direção das forças que o mesmo induz no meio metálico é governada pela polarização dos ímãs do arranjo PPM,

como é apresentado na Figura 2.4. Logo, não é possível associar diferentes ímãs às bobinas independentes em uma configuração de PPM EMAT convencional.

Com essa limitação em mente, foram propostas duas configurações de dispositivos do tipo PPM EMAT não convencionais, que pudessem se aproveitar dos mecanismos de interferência unidirecional. São elas, o *Dual-Linear Coil PPM EMAT* [32] e o *Side-Shifted PPM EMAT* [31] que são explicados a seguir.

2.3.2.1

Dual-Linear Coil PPM EMAT

Uma alternativa de dispositivo do tipo PPM EMAT com geração unidirecional de ondas é o *Dual-Linear Coil PPM EMAT* [32], com construção apresentada na Figura 2.7. Esse consiste-se em dois arranjos PPMs diferentes, posicionados de forma intercalada ao longo do eixo horizontal. As bobinas deixam de ser do tipo *racetrack*, com as espiras sendo enroladas em volta de cada ímã. As direções das forças de Lorentz são alteradas ao se atentar ao sentido da corrente imposta nos enrolamentos das espiras.

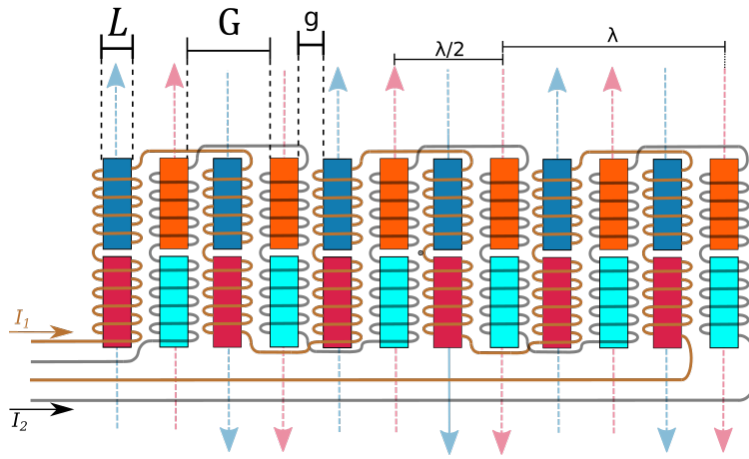


Figura 2.7: Configuração do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, baseado em [32]. O primeiro PPM é composto por ímãs azul e vermelho e bobina de cor cobre. O segundo PPM é composto por ímãs de cor laranja e ciano e sua bobina equivalente é cinza. Setas verticais azul e rosa representam as forças de Lorentz geradas pelo primeiro e segundo PPMs, respectivamente. O comprimento de cada ímã é L e a separação longitudinal entre ímãs é g . O comprimento de onda nominal do dispositivo é $\lambda = 4(L + g)$.

Essa construção possui boa unidirecionalidade, apresentando radiação desprezível para direções laterais, dado que os dois arranjos PPMs estão perfeitamente alinhados. Entretanto, o *Dual-Linear Coil PPM EMAT* apresenta um comprimento de onda duas vezes maior do que o usual ao utilizar ímãs de mesmas dimensões em um PPM EMAT convencional, já que cada PPM necessita de um espaçamento largo o suficiente para intercalar os ímãs do outro

PPM. Como pode-se ver na Figura 2.7, é adicionado uma separação longitudinal intra-arranjo, G , que aumenta a separação entre ímãs pertencentes ao mesmo arranjo, portanto o comprimento de onda desse dispositivo é dado por:

$$\lambda = 2(L + G) = 4(L + g) \quad . \quad (2-11)$$

Essa característica, além de aumentar o tamanho do dispositivo, obriga o usuário a trabalhar com frequências menores do que ele utilizaria com um PPM EMAT convencional, para ímãs de mesma largura L , ou em um *Side-Shifted PPM EMAT*, explicado na próxima seção.

2.3.2.2

Side-Shifted PPM EMAT

O PPM EMAT unidirecional desenvolvido nesse trabalho é do tipo *Side-Shifted PPM EMAT* [31]. Esse consiste-se de dois arranjos PPM e duas bobinas do tipo *racetrack*. Como é necessário criar duas fontes de ondas independentes, os PPMs devem ser transladados lateralmente, no eixo z , e as bobinas devem acomodadas da mesma forma. A Figura 2.8 apresenta a configuração original do *Side-Shifted PPM EMAT*, apresentado em [31]. O primeiro arranjo PPM é representado pelos quadrados de cor azul e vermelho, o segundo é representado pelos quadrados ciano e rosa. Cada PPM é posicionado sobre uma bobina do tipo *racetrack*, sendo o primeiro sobre a bobina laranja e o segundo sobre a bobina azul. Seguindo uma construção similar ao PPM EMAT convencional, diferente do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, que necessita de enrolamentos de espiras feitos nos próprios ímãs de cada PPM. A geração unidirecional do *Side-Shifted PPM EMAT* ocorre quando transladam-se os PPMs também na direção x , com separação longitudinal igual a $\lambda/4$ e as correntes aplicadas, I_1 e I_2 , sejam defasadas de 90° . Perceba que um *Side-Shifted PPM EMAT* pode ser dividido em dois dispositivos PPM EMATs convencionais, colocados um sobre o outro e com separações que permitam não só a geração independentes de ondas como também a interferência destrutiva e construtiva dessas ondas.

PPM EMATs convencionais usualmente apresentam uma pequena separação lateral entre fileiras de ímãs, que pertençam ao mesmo PPM, como apresentado na Figura 2.4. No *Side-Shifted PPM EMAT*, entretanto, essa separação deve ser maior, de forma a acomodar uma fileira de ímãs pertencentes ao outro PPM, a separação entre fileiras do mesmo arranjo (*intra-array*), portanto, é $d = 2D + w$, onde w é a largura do ímã e D é a separação entre arranjos distintos (*inter-array*).

O comprimento de onda nominal do dispositivo é dado pelo período espacial do PPM:

$$\lambda = 2(L + g) \quad , \quad (2-12)$$

onde L é o comprimento dos ímãs e g é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira. Perceba que o comprimento de onda do *Side-Shifted PPM EMAT* é igual ao PPM EMAT convencional, diferente do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, que possui o dobro do comprimento de onda. Ou seja, com o *Side-Shifted PPM EMAT* é possível trabalhar com menores comprimentos de onda e, conseqüentemente, maiores frequências [16, 35].

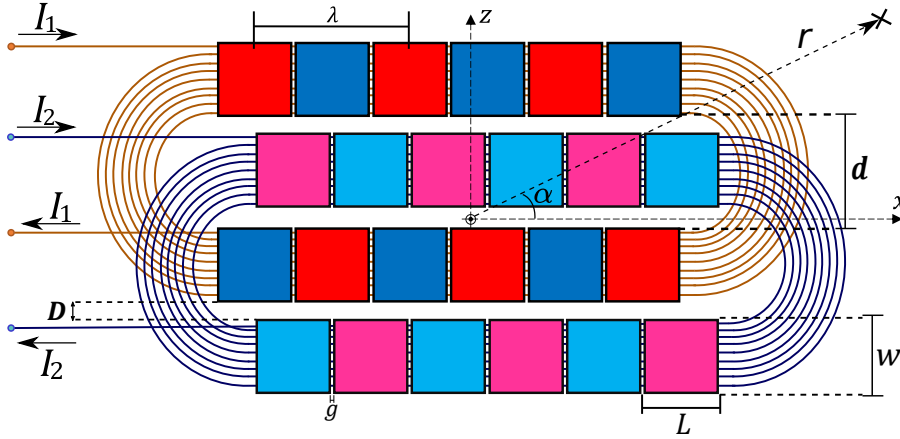


Figura 2.8: Configuração do *Side-shifted PPM EMAT* original, apresentado em [31], com $Q = 2$ fileiras de ímãs por PPM. Blocos vermelhos e azuis representam os polos norte e sul magnéticos, respectivamente, do primeiro arranjo PPM enquanto os blocos magenta e ciano representam os polos norte e sul magnéticos, respectivamente, do segundo arranjo PPM. As setas pretas, à esquerda, são as correntes injetadas em cada bobina. L é o comprimento do ímã, w é a largura do ímã, g é o gap longitudinal entre ímãs do mesmo arranjo, D é a separação lateral entre as diferentes fileiras de ímãs, d é a separação lateral entre ímãs do mesmo PPM e λ é comprimento de onda nominal do dispositivo. São apresentados também a distância radial r e o ângulo α para um ponto de interesse, marcado com um x .

O *Side-shifted PPM EMAT* original, entretanto, apresentava lóbulos traseiros laterais que não podem ser negligenciados [31]. Os mesmos estão posicionados na região angular definida por $90^\circ < \alpha < 270^\circ$, onde α é o ângulo a partir do eixo x positivo, como apresentado na Figura 2.8. Tais lóbulos, mesmo que reduzidos quando comparados à radiação traseira gerada por um PPM EMAT convencional, podem causar complicações quando suas ondas são refletidas em placas finitas. Em contraste ao dispositivo *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, lóbulos traseiros laterais ocorrem devido ao inerente desalinhamento de forças geradas por cada PPM, dado que os arranjos de ímãs são deslocados lateralmente, de forma a acomodar as fileiras pertencentes ao outro arranjo.

Nesse trabalho, com o objetivo de reduzir os lóbulos traseiros laterais do *Side-Shifted PPM EMAT* original, foram empregadas duas alternativas,

diminuir a separação lateral entre as fileiras de ímãs, definida como D na Figura 2.8 e alterar o número de fileiras de ímãs por PPM, aqui definido como Q . Na configuração original do *Side-Shifted PPM EMAT*, por exemplo, $Q = 2$, porque existem duas fileiras de ímãs no primeiro PPM e duas no segundo PPM. Essas alternativas foram escolhidas porque, a princípio, diminuem o desalinhamento de forças acima citado, dado que a primeira aproxima os dois PPMs uns aos outros e, a segunda, acarreta em mais fontes de ondas ultrassônicas, o que pode diminuir um desalinhamento relativo entre os PPMs. Essas alternativas são discutidas mais profundamente na seção. 5.3.

Ao se construir *Side-Shifted PPM EMATs* com $Q = 1$ fileiras de ímãs por bobina, é possível utilizar a bobina convencional do tipo *racetrack* de um PPM EMAT. Isso é ilustrado na Figura 2.9, onde as seções de bobina que não estejam posicionadas sob uma fileira de ímãs não age como fonte de ondas ultrassônicas. Para valores de Q maiores do que 2, entretanto, é necessário utilizar um outro tipo de bobina, que possua mais seções retas de espiras, sobre onde serão colocados os ímãs. Essa nova bobina é apresentada nas Figuras 2.10 e 2.11 para $Q = 3$ e $Q = 4$ fileiras por PPM, respectivamente. A mesma é chamada de *multi-lap racetrack*. Perceba que a mesma também pode ser utilizada para *Side-Shifted PPM EMATs* com qualquer valor de Q menor ou igual a 4, pois quando uma de suas seções retas não estiverem sob uma fileira de ímãs, essa não funcionará como fonte de ondas. Por isso, de forma a padronizar as bobinas a serem utilizadas no trabalho, todos os experimentos foram realizados utilizando bobinas do tipo *multi-lap racetrack*.

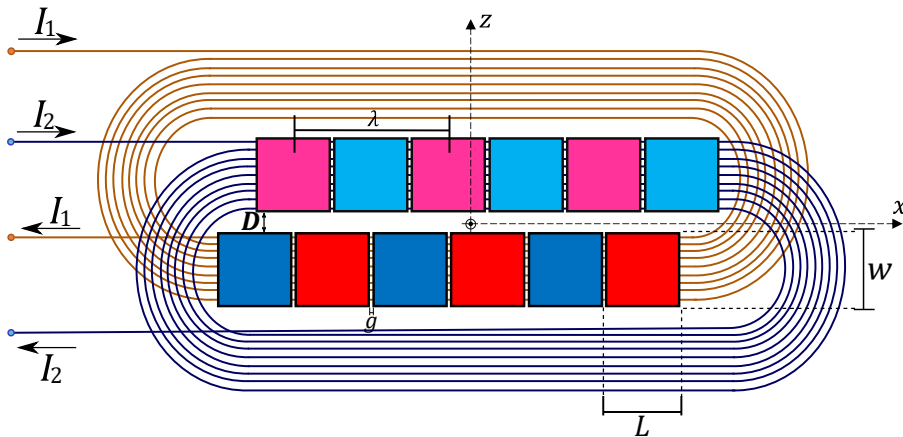


Figura 2.9: *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 1$ fileiras de ímãs por PPM com bobina convencional do tipo *racetrack*.

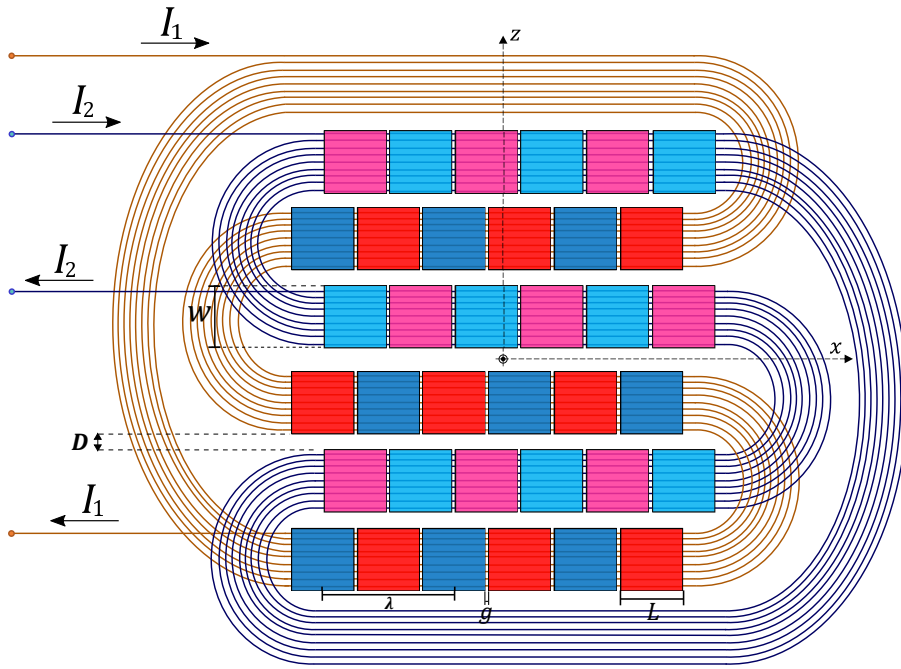


Figura 2.10: *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 3$ fileiras de ímãs por PPM com bobina do tipo *multi-lap racetrack*.

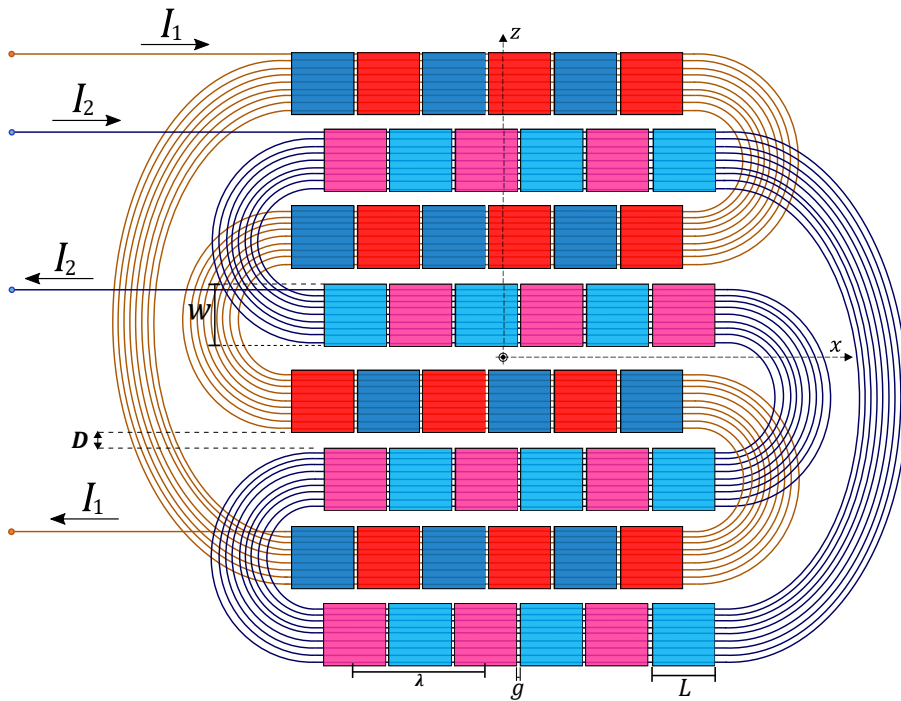


Figura 2.11: *Side-Shifted PPM EMAT* com $Q = 4$ fileiras de ímãs por PPM com bobina do tipo *multi-lap racetrack*.

Neste capítulo, é apresentado o modelo analítico desenvolvido para a simulação de PMM EMATs duplos. Ele se baseia no trabalho de Ma et al. [46], Lee et al. [47] e Baiotto [48]. A projeção de cada espira sob um ímã é considerada como uma fonte de ondas ultrassônicas. Partindo do princípio de que, em campos distantes, uma única espira é composta de infinitos elementos diferenciais de comprimento, cada um funcionando como uma fonte pontual de ondas propagantes, é possível calcular o campo total gerado por uma única espira, ao integrar o campo gerado por uma fonte pontual no comprimento da espira sob o ímã, utilizando o princípio de Huygens [33]. Esse método é chamado de *Line Source* [46–49]. Esse modelo pode ser utilizado a partir de simplificações sobre o efeito de *lift-off*, que é a alteração da impedância mútua entre o transdutor e o meio metálico ao se variar a distância entre os mesmos [50–52], e efeito pelicular [16, 23] ao operar em placas de alumínio em comprimentos de onda da ordem de dezenas de milímetros [23, 42], porque, com essas simplificações, pode-se assumir que as espiras das bobinas criam forças que agem de forma homogênea ao longo da superfície do material sobre o qual o transdutor esteja posicionado.

A fim de obter a contribuição global do dispositivo, é necessário criar diferentes sistemas de coordenadas de forma a combinar os campos gerados por cada espira dentro de um dispositivo que possua dois, ou mais, PPMs independentes. No total, quatro diferentes sistemas de coordenadas são utilizados. Para isso, três passos de parametrizações diferentes são empregados, a saber: Seleção do PPM; Seleção da Célula e Seleção da Espira.

Esses passos, assim como o método *Line Source*, são detalhados, de forma a calcular a expressão final do campo gerado por um PPM EMAT duplo em função da distância e do ângulo de medição. Para fins de ilustração, trabalha-se com o caso original do *Side-Shifted PPM EMAT*, ou seja dois grupos de PPMs com $Q = 2$ arranjos de ímãs, porém toda a metodologia é aplicável para qualquer números de arranjos e grupos de PPMs utilizados. Podendo ser, inclusive, utilizado para o caso do PPM EMAT convencional, apresentado na seção 2.2 e o *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, apresentado na seção 2.3.2.1.

3.1

Parametrizações Realizadas

3.1.1

Seleção do PPM

O primeiro passo é selecionar qual grupo de PPM será escolhido para calcular o campo gerado. Esse passo deve ser realizado P vezes, onde P é igual ao número de arranjos de PPMs trabalhados. No caso do PPM EMAT duplo, P é igual a 2. O índice do PPM escolhido é representado pelo subscrito p , ele pode assumir, nesse caso, os valores 1 ou 2.

A Figura 3.1 apresenta o caso onde o PPM com ímãs representados pelas cores vermelha (norte magnético) e azul (sul magnético) é escolhido. Aqui convencionou-se que o primeiro PPM é representado por $p = 1$ e nomeado como PPM 1. O segundo PPM, $p = 2$, é composto pelos ímãs de cor magenta e ciano.

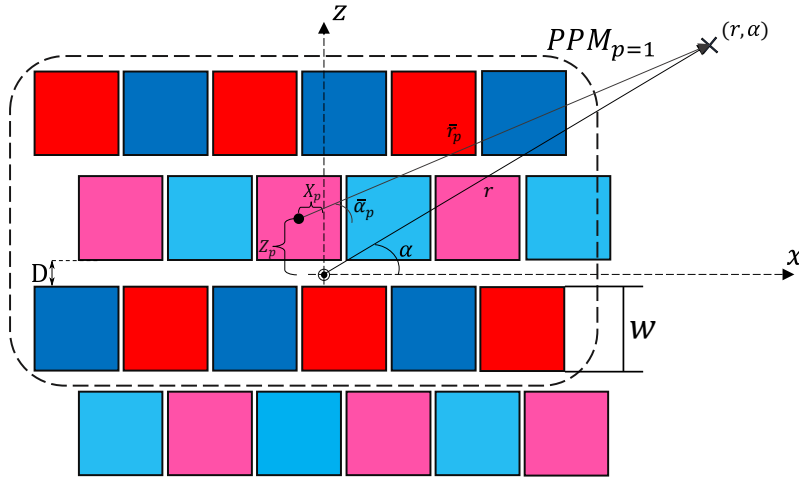


Figura 3.1: Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar o conjunto PPM a ser trabalhado, envolvido pelo retângulo tracejado, baseada em [38]. Blocos vermelhos e azuis representam os ímãs de polos norte e sul, respectivamente, relacionados ao primeiro PPM enquanto blocos magenta e ciano representam os ímãs de polos sul e norte, respectivamente, relacionados ao segundo PPM.

O sistema de coordenadas global, representado pelo par (x, z) , tem sua origem, $(x, z) = (0, 0)$, no meio do PPM EMAT duplo. Seja um ponto arbitrário, com coordenadas polares (r, α) , em que deseja-se calcular o campo gerado pelo dispositivo. Cria-se um novo sistema de coordenadas, com origem no centro do PPM de índice p , escolhido. Esse é definido em coordenadas cartesianas e polares pelos pares (\bar{x}_p, \bar{z}_p) e $(\bar{r}_p, \bar{\alpha}_p)$, respectivamente.

O ângulo para o ponto de interesse, $\bar{\alpha}_p$, é encontrado utilizando as equações trigonométricas abaixo:

$$\cos(\bar{\alpha}_p) \bar{r}_p = \cos(\alpha) r - X_p \quad , \quad (3-1)$$

$$\sin(\bar{\alpha}_p) \bar{r}_p = \sin(\alpha) r - Z_p \quad , \quad (3-2)$$

$$\bar{\alpha}_p = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\alpha) r - Z_p}{\cos(\alpha) r - X_p} \right) \quad , \quad (3-3)$$

onde X_p e Z_p são os deslocamentos longitudinal e lateral, respectivamente, do PPM de índice p em relação à origem do sistema global. Para obter-se um deslocamento longitudinal de um quarto de comprimento de onda, X_p , deve sempre ser igual a $\pm\lambda/8$, onde λ é o comprimento de onda de interesse, enquanto Z_p é:

$$Z_p = \pm \frac{D + w}{2} \quad , \quad (3-4)$$

onde D é a separação lateral entre fileiras de ímãs e w é a largura dos ímãs.

Para o caso representado na Figura 3.1, do *Side-shifted PPM EMAT*, $X_1 = -\lambda/8$ e $Z_1 = +(D + w)/2$, enquanto $X_2 = -X_1$ e $Z_2 = -Z_1$.

A distância radial, \bar{r}_p , é calculada através de (3-5) ou, nos casos em que $\bar{\alpha}_p$ seja igual a 90° ou 270° , utiliza-se (3-6)

$$\bar{r}_p = \frac{\cos(\alpha) r - X_p}{\cos(\bar{\alpha}_p)} \quad , \quad (3-5)$$

$$\bar{r}_p = \frac{\sin(\alpha) r - Z_p}{\sin(\bar{\alpha}_p)} \quad . \quad (3-6)$$

Com isso, pode-se definir o novo sistema de coordenadas centrado no PPM de interesse.

3.1.2

Seleção de Célula

Uma vez definido o sistema de coordenadas centrado no PPM escolhido, deve-se definir qual célula será utilizada para o cálculo do campo gerado. Aqui, uma célula é definida como uma coleção de ímãs posicionados na mesma coordenada horizontal. O índice que representa cada uma das células trabalhadas é o subscrito c . Tal índice é composto pelos números inteiros, com exceção do zero, no intervalo de $-N/2$ a $+N/2$, onde N é o número total de células.

A Figura 3.2 exemplifica a escolha da segunda célula, contando da esquerda para a direita, de um PPM com $N = 6$ células. A mesma é centrada em $(-\bar{x}_c, 0)$, onde \bar{x}_c é

$$\bar{x}_c = \text{sign}(c) \left((|c| - 1) (L + g) + \frac{L + g}{2} \right) \quad . \quad (3-7)$$

O sistema de coordenadas, com origem em $(-\bar{x}_c, 0)$, tem coordenadas cartesianas e polares dadas pelos pares $(\tilde{x}_c, \tilde{z}_c)$ e $(\tilde{r}_c, \tilde{\alpha}_c)$, respectivamente. A

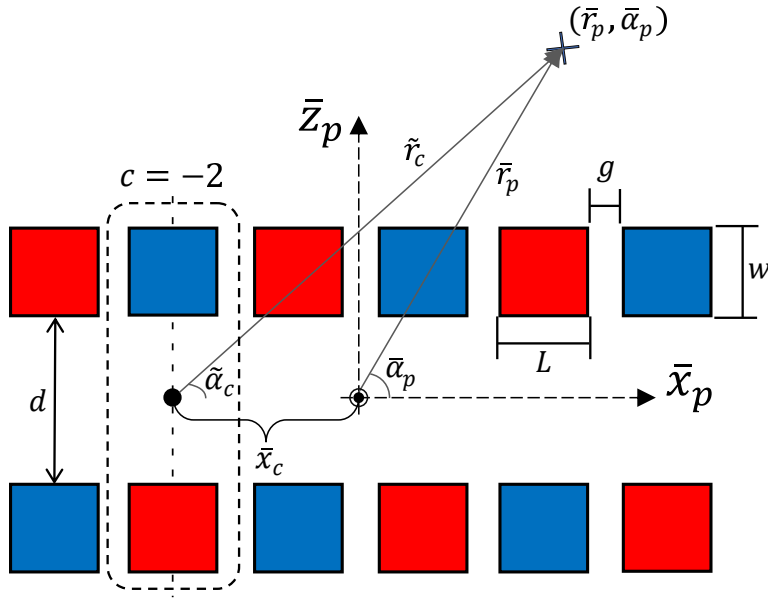


Figura 3.2: Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar a célula a ser calculada, baseada em [38].

distância radial para o ponto de interesse, \tilde{r}_c é obtida através da lei dos cossenos:

$$\bar{r}_c^2 = \bar{r}_p^2 + \bar{x}_c^2 - 2 \bar{r}_p \bar{x}_c \cos(\bar{\alpha}_p) \quad , \quad (3-8)$$

$$\tilde{r}_c = \sqrt{\bar{r}_p^2 + \bar{x}_c^2 - 2\bar{r}_p\bar{x}_c \cos(\bar{\alpha}_p)} \quad . \quad (3-9)$$

O ângulo para o ponto de interesse, $\tilde{\alpha}_c$, é obtido utilizando a equação trigonométrica abaixo

$$\sin (\tilde{\alpha}_c) \tilde{r}_c = \sin (\bar{\alpha}_p) \bar{r}_p \quad . \quad (3-10)$$

Ao isolar-se a variável de interesse, tem se

$$\tilde{\alpha}_c = \sin^{-1} \left(\frac{\sin(\bar{\alpha}_p) \bar{r}_p}{\tilde{r}_c} \right) \quad . \quad (3-11)$$

É importante ressaltar que, tanto (3-9) quanto (3-11) são válidas para valores positivos ou negativos de \bar{x}_c .

3.1.3 Seleção de Espira

A última parametrização consiste na seleção da espira a ser calculada como fonte linear de campo propagante. O índice que representa as espiras a serem calculadas é o subscrito m . O mesmo é composto de números inteiros, com exceção do zero, dentro do intervalo $-M$ a $+M$, onde M é o número de espiras sob um ímã. M é função da largura do ímã, w , e do espaçamento entre espiras, ζ , que pode ser aproximado pelo diâmetro da espira quando essas são

colocadas de maneira contígua umas com as outras. Portanto, ao maximizar o número de espiras por ímã, tem-se

$$M \simeq \frac{w}{\zeta} \quad . \quad (3-12)$$

A Figura 3.3 apresenta um exemplo da escolha da segunda espira, de baixo para cima, sob o ímã superior. Essa está centrada em $(0, +\tilde{z}_m)$, onde \tilde{z}_m é

$$\tilde{z}_m = \text{sign}(m) \left(d/2 + \zeta (|m| - 1) \right) \quad . \quad (3-13)$$

O sistema de coordenadas, com origem em $(0, +\tilde{z}_m)$, tem coordenadas cartesianas e polares dadas pelos pares (\hat{x}_m, \hat{z}_m) e $(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m)$, respectivamente. A distância radial para o ponto de interesse, \hat{r}_m , é obtida através da lei dos cossenos:

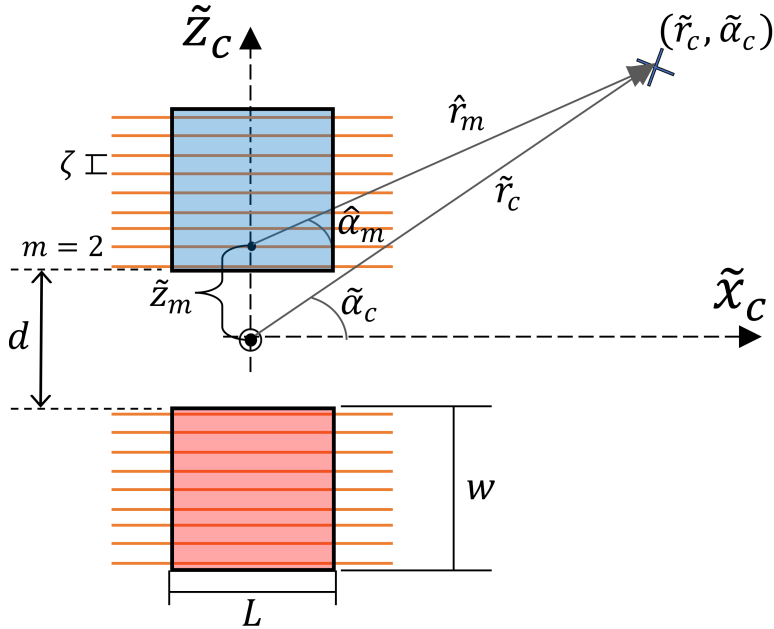


Figura 3.3: Representação esquemática da parametrização realizada ao selecionar a espira a ser trabalhada, baseada em [38].

$$\hat{r}_m^2 = \tilde{r}_c^2 + \tilde{z}_m^2 - 2 \tilde{r}_c \tilde{z}_m \sin(\tilde{\alpha}_c) \quad , \quad (3-14)$$

$$\hat{r}_m = \sqrt{\tilde{r}_c^2 + \tilde{z}_m^2 - 2 \tilde{r}_c \tilde{z}_m \sin(\tilde{\alpha}_c)} \quad . \quad (3-15)$$

Enquanto o ângulo para o ponto de interesse, $\hat{\alpha}_m$, é obtido utilizando a equação trigonométrica abaixo

$$\cos(\hat{\alpha}_m) \hat{r}_m = \cos(\tilde{\alpha}_c) \tilde{r}_c \quad , \quad (3-16)$$

$$\hat{\alpha}_m = \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\tilde{\alpha}_c) \tilde{r}_c}{\hat{r}_m} \right) \quad . \quad (3-17)$$

É importante ressaltar que, caso o dispositivo simulado possua $Q \neq 2$ fileiras de ímãs por PPM. O deslocamento vertical, \tilde{z}_m , a ser calculado é diferente. Nesse caso, deve-se levar em conta a existência ou não de fileiras de ímãs sobre a espira selecionada. Por exemplo, caso $Q = 1$, \tilde{z}_m deve ser $-(d/2 + \zeta(|m| - 1))$ para $p = 1$, porque o PPM selecionado somente possui uma fileira de ímãs posicionada em $z < 0$, como apresentado na Figura 2.9.

3.2

Cálculo do Campo

3.2.1

Campo Gerado por uma Única Espira

Com o sistema de coordenadas com origem no centro de uma espira, cuja imagem na superfície do meio condutor é considerada uma como fonte linear para o campo propagante no ponto de interesse, $(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m)$, é possível utilizar o método *Line Source*. Primeiramente, é necessário dividir a espira em elementos infinitesimais, como ilustrado na Figura 3.4, através do quadrado tracejado. Abaixo é demonstrado como calcular a distância de um ponto infinitesimal de linha para o ponto de interesse $(\hat{\rho}_m, \hat{\alpha}_m)$.

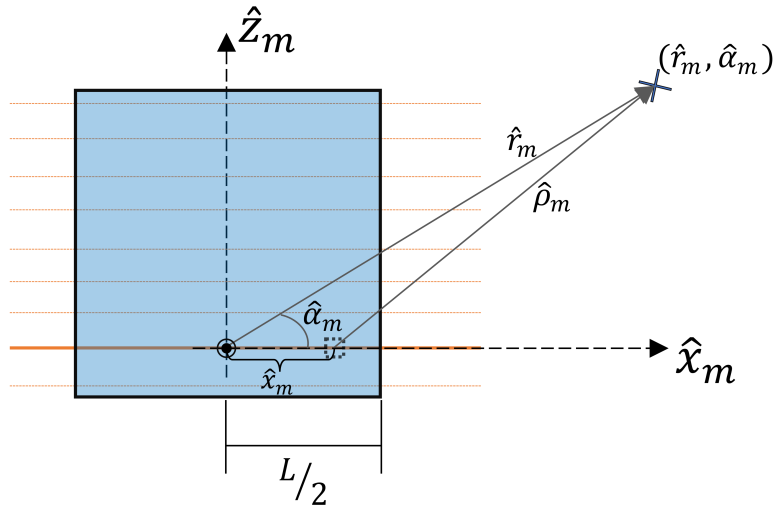


Figura 3.4: Representação esquemática da parametrização realizada ao escolher o diferencial de espira a ser integrado, baseada em [38].

Usando a lei dos cossenos:

$$\hat{\rho}_m^2 = \hat{r}_m^2 + \hat{x}_m^2 - 2\hat{r}_m\hat{x}_m\cos(\hat{\alpha}_m) \quad , \quad (3-18)$$

$$\hat{\rho}_m = \sqrt{\hat{r}_m^2 + \hat{x}_m^2 - 2\hat{r}_m\hat{x}_m\cos(\hat{\alpha}_m)} \quad . \quad (3-19)$$

Dado que $\hat{r}_m \gg \hat{x}_m$, (3-19) pode ser simplificada para

$$\hat{\rho}_m = \sqrt{\hat{r}_m^2 - 2\hat{r}_m\hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m)} \quad , \quad (3-20)$$

$$\hat{\rho}_m = \hat{r}_m \sqrt{1 - \frac{2\hat{r}_m\hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m)}{\hat{r}_m}} \quad . \quad (3-21)$$

A equação (3-21) pode ser simplificada através da sua expansão por série de Taylor de primeira ordem [53]:

$$\hat{\rho}_m \simeq \hat{r}_m - \hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m) \quad (3-22)$$

Para modelar o campo gerado por uma fonte pontual, foi utilizada a função de Green [33], descrita abaixo:

$$G(\hat{\rho}_m, t) = \frac{\pi j}{2} H_0^{(1)}(\kappa \hat{\rho}_m) e^{-j\omega t} \quad (3-23)$$

onde $H_0^{(1)}$ é a função de Hankel do primeiro tipo [53], ω é a frequência angular e κ é o número de onda, dado por:

$$\kappa = \frac{\omega}{c_T} = \frac{2\pi f}{c_T} \quad (3-24)$$

Quando trabalha-se em campos distantes, ou seja, $\hat{\rho}_m \gg L$, a função de Hankel é aproximada por [53]

$$\lim_{|\kappa \hat{\rho}_m| \rightarrow \infty} H_n^{(1)}(\kappa \hat{\rho}_m) = \sqrt{\frac{-2j}{\pi \kappa \hat{\rho}_m}} j^{-n} e^{j\kappa \hat{\rho}_m} \quad . \quad (3-25)$$

Portanto, a equação (3-23) pode ser aproximada para

$$G(\hat{\rho}_m, t) \approx \frac{\pi j}{2} \sqrt{\frac{-2j}{\pi \kappa \hat{\rho}_m}} e^{j\kappa \hat{\rho}_m} e^{-j\omega t} \quad , \quad (3-26)$$

$$G(\hat{\rho}_m, t) \approx \sqrt{\frac{\pi^2 j^2}{4}} \sqrt{\frac{-2j}{\pi \kappa \hat{\rho}_m}} e^{j(\kappa \hat{\rho}_m - \omega t)} \quad , \quad (3-27)$$

$$G(\hat{\rho}_m, t) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa \hat{\rho}_m}} \sqrt{j} e^{j(\kappa \hat{\rho}_m - \omega t)} \quad . \quad (3-28)$$

A equação final do campo gerado por uma fonte pontual, em campo distante, é dada por

$$G(\hat{\rho}_m, t) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa \hat{\rho}_m}} e^{j(\kappa \hat{\rho}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} \quad . \quad (3-29)$$

De forma a calcular o campo gerado por uma espira, aqui definido como $\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t)$, a equação (3-29) deve ser integrada no comprimento L da espira:

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = A_m \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} G(\hat{\rho}_m, t) dl \quad , \quad (3-30)$$

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = A_m \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa \hat{\rho}_m}} e^{j(\kappa \hat{\rho}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} d\hat{x}_m \quad , \quad (3-31)$$

onde A_m é uma constante relacionada a fatores como a intensidade do ímã posicionado acima da espira, a magnitude da corrente aplicada e o *lift-off* da montagem, além de constantes do meio.

Aplicando (3-22) na equação (3-31), obtém-se

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa(\hat{r}_m - \hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m))}} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} e^{j(\kappa(\hat{r}_m - \hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m)) - \omega t + \frac{\pi}{4})} d\hat{x}_m. \quad (3-32)$$

Como citado anteriormente, $\hat{r}_m \gg \hat{x}_m$, logo o denominador dentro da raiz quadrada pode ser simplificado por $2\kappa\hat{r}_m$. Portanto, deve-se resolver a expressão a seguir

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} e^{j(\kappa\hat{r}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} e^{-j\kappa\hat{x}_m \cos(\hat{\alpha}_m)} d\hat{x}_m. \quad (3-33)$$

Ao integrar (3-33) em \hat{x}_m , obtém-se

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} e^{j(\kappa\hat{r}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} \frac{e^{-j\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)} - e^{j\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)}}{-j\kappa \cos(\hat{\alpha}_m)}. \quad (3-34)$$

A equação (3-34) para o campo gerado por uma espira pode ser simplificada, utilizando a fórmula de Euler:

$$\sin(\gamma) = \frac{e^{j\gamma} - e^{-j\gamma}}{2j}. \quad (3-35)$$

Aplicando (3-35) em (3-34), obtém-se a expressão final para o campo propagante gerado por uma espira:

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) = 2A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{\kappa \cos(\hat{\alpha}_m)} e^{j(\kappa\hat{r}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})}, \quad (3-36)$$

\tilde{R}_m pode ser considerado como o campo de ondas (deslocamento ou velocidade de partícula ortogonal ao plano e à propagação) das ondas SH geradas.

Analizando a equação (3-36), é possível perceber que o campo gerado por uma única espira segue um comportamento angular da forma $\text{sinc}(\alpha)$, o que é coerente com a condição inicialmente imposta de se estar em campos distantes (far-field).

3.2.2

Campo Total do *Side-Shifted PPM EMAT*

O campo produzido por cada célula, c , é dado pelo somatório de todas as espiras colocadas sob os ímãs:

$$\tilde{R}_c(\tilde{r}_c, \tilde{\alpha}_c, t) = \sum_{\substack{m \neq 0 \\ m=-M}}^M \hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t), \quad (3-37)$$

$$\tilde{R}_c(\tilde{r}_c, \tilde{\alpha}_c, t) = \sum_{\substack{m \neq 0 \\ m=-M}}^M A_m L \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)} e^{j(\kappa\hat{r}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} \quad (3-38)$$

O campo total, produzido por todas as células que compõem o PPM EMAT, é dado pela soma de todas as células:

$$\bar{R}_p(\bar{r}_p, \bar{\alpha}_p, t) = \sum_{\substack{c \neq 0 \\ c=-N/2}}^{N/2} \tilde{\Delta}_c \tilde{R}_c(\tilde{r}_c, \tilde{\alpha}_c, t) \quad , \quad (3-39)$$

onde $\tilde{\Delta}_c$ é um fator utilizado para impor a alternância na polaridade de cada célula que compõem um PPM:

$$\tilde{\Delta}_c = \begin{cases} +1, & \text{se } c \text{ é par e positivo ou ímpar e negativo} \\ -1, & \text{se } c \text{ é ímpar e positivo ou par e negativo} \end{cases} \quad (3-40)$$

A expressão final para o campo gerado pelo PPM de índice p é, portanto:

$$\bar{R}_p(\bar{r}_p, \bar{\alpha}_p, t) = \sum_{\substack{c \neq 0 \\ c=-N/2}}^{N/2} \tilde{\Delta}_c \sum_{\substack{m \neq 0 \\ m=-M}}^M \hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) \quad (3-41)$$

A expressão completa para o campo gerado por um PPM-múltiplo é dada pela soma de cada campo gerado individualmente:

$$R(r, \alpha, t) = \sum_{p=1}^P \bar{R}_p(\bar{r}_p, \bar{\alpha}_p, t - \bar{t}_p) \quad , \quad (3-42)$$

onde \bar{t}_p é um atraso temporal que pode ser aplicado em cada arranjo de PPM, p . Para o caso do PPM EMAT duplo, objetivando-se a geração unidirecional, \bar{t}_p deve ser equivalente a um quarto do comprimento de onda trabalhado:

$$\bar{t}_p = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{T}{4} \quad (3-43)$$

O campo total gerado pelo *Side-Shifted PPM EMAT* é encontrado ao aplicar (3-38) em (3-39), que por sua vez é aplicada em (3-42):

$$R(r, \alpha, t) = \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{c \neq 0 \\ c=-N/2}}^{N/2} \tilde{\Delta}_c \sum_{\substack{m \neq 0 \\ m=-M}}^M \hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m, t) \quad , \quad (3-44)$$

$$R(r, \alpha, t) = \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{c \neq 0 \\ c=-N/2}}^{N/2} \tilde{\Delta}_c \sum_{\substack{m \neq 0 \\ m=-M}}^M A_m L \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{\kappa\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)} e^{j(\kappa\hat{r}_m - \omega t + \frac{\pi}{4})} \quad (3-45)$$

Lembrando que \hat{r}_m e $\hat{\alpha}_m$ são relacionados a \tilde{r}_c e $\tilde{\alpha}_c$ através de (3-15) e (3-17), respectivamente. Esses, por sua vez, se relacionam com \bar{r}_p e $\bar{\alpha}_p$ através

de (3-9) e (3-11). Essas últimas são, finalmente, obtidas através de (3-5) e (3-3).

3.3

Algoritmos para o uso do modelo analítico

O modelo analítico foi implementado em duas versões. A primeira, mais simplificada, é chamada de Modelo *Continuous Wave*, ou *CW*, a segunda, mais complexa, é chamada de Modelo *Time Domain*, ou *TD*. Ambas foram implementadas em MATLAB®.

3.3.1

Modelo Continuous Wave

Nesse modelo é considerado que o dispositivo PPM EMAT duplo é excitado utilizando dois sinais senoidais, defasados de 90°. Com isso, o PPM EMAT duplo opera somente na frequência dada por $f_c = c_T/\lambda$.

O modelo consiste no uso da equação (3-36) omitindo-se o termo $e^{-j\omega t}$, ou seja, calcula-se o campo gerado por uma espira através da seguinte equação:

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m) = A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(\kappa\frac{L}{2}\cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{\kappa\cos(\hat{\alpha}_m)} e^{j(\kappa\hat{r}_m + \frac{\pi}{4})} \quad (3-46)$$

O termo omitido é retirado de (3-36) porque, nesse modelo, deseja-se obter o módulo e fase do campo gerado pelo PPM EMAT duplo, dada uma excitação harmônica $e^{-j\omega t}$. A amplitude e fase são dados, respectivamente, por

$$A_m \sqrt{\frac{\pi}{2\kappa\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(\kappa\frac{L}{2}\cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{\kappa\cos(\hat{\alpha}_m)} \quad , \quad (3-47)$$

$$e^{j(\kappa\hat{r}_m + \frac{\pi}{4})} \quad . \quad (3-48)$$

É importante observar que tanto o termo A_m , presente no módulo, quanto o atraso $\pi/4$, presente na fase, podem ser desconsiderados na implementação do algoritmo. Isso pode ser feito porque, o diagrama de radiação é calculado a partir de uma normalização pelo máximo, e uma defasagem quando aplicada globalmente, independente de \hat{r}_m ou $\hat{\alpha}_m$, não altera o resultado final.

Ao utilizar a equação (3-46) para diferentes valores de α , seguindo as parametrizações apresentadas na seção 3, obtém-se o campo gerado por um PPM EAMT duplo em uma distância r . Para se obter o diagrama de radiação, deve-se retirar o módulos e normalizá-los pelo máximo.

3.3.2

Modelo Time Domain

Dado que o dispositivo PPM EMAT duplo é usualmente excitado com sinais do tipo *burst*, defasados de 90° , diferentes componentes em frequência são introduzidas no dispositivo, não somente a frequência nominal de operação, $f_c = c_T/\lambda$. Isso impacta no mecanismo de interferência sob o qual o transdutor opera, já que a translação longitudinal é feita pensando na frequência nominal dada pela construção do PPM, como explicado na seção 2.3.1. Portanto, é importante considerar todas as componentes de frequências (banda de frequência) ao criar um modelo computacional capaz de fornecer a forma de onda irradiada em cada direção.

Cada componente em frequência tem resposta distinta no modelo analítico porque o campo irradiado é dependente da frequência de excitação. Essa dependência está presente no número de onda, κ , em (3-45):

$$\kappa = \frac{2\pi f}{c_p} \quad , \quad (3-49)$$

onde, para o modo SH0, $c_p = c_T$.

Quando considera-se que o sinal de excitação não é mais um sinal senoidal, mas sim um *burst* senoidal com número finito de ciclos, o termo f em (3-49) passa a representar cada componente de frequência que pode ser obtida pela transformada de Fourier do sinal de excitação [54].

O algoritmo para o modelo analítico completo, chamado nesse trabalho de modelo *Time Domain*, ou *TD*, é detalhado a seguir:

1. Cria-se o sinal de excitação no tempo, centrado na frequência nominal do dispositivo criado, dada por:

$$f_c = \frac{c_p}{\lambda} \quad . \quad (3-50)$$

Um exemplo desse sinal dado por um *burst* senoidal de 8 ciclos centrado em 259 kHz é exibido na 3.5(a).

2. Cria-se também outro sinal de excitação no tempo, igual ao anterior, porém defasado de 90° , de forma a obter a unidirecionalidade desejada. No domínio do tempo, isso significa um atraso de $T/4$, onde T é o período do sinal criado anteriormente.
3. Os espectros em frequência dos sinais de excitação são gerados a partir de suas transformadas de Fourier. No MATLAB ®isso é feito através da função *fft* [55]. A Figura 3.5(b) apresenta o espectro do sinal de excitação com defasagem zero. Pode-se ver que ele tem um pico na frequência central do *burst* senoidal, nesse caso, $f_c = 259$ kHz.

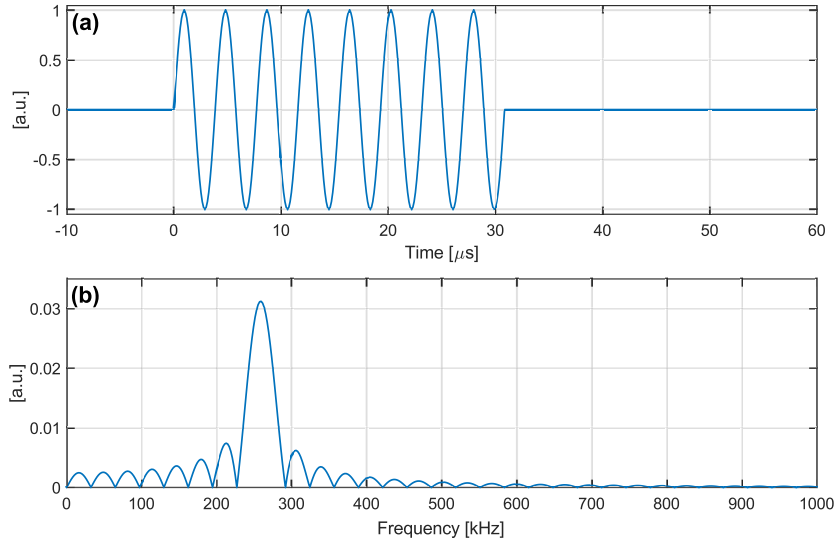


Figura 3.5: Sinal de excitação utilizado no modelo TD , composto por um *burst* senoidal de 8 ciclos centrado em 259 kHz, nos domínios temporal (a) e de frequência (b).

4. Todas as componentes em frequência são aplicadas na equação (3-49). Isso retorna um número de onda em função da frequência trabalhada. Do ponto de vista computacional, κ passa a ser um vetor de tamanho n , onde n é o número de amostras do espectro de frequência criado. É importante ressaltar que o método computacional deve levar em conta também as componentes negativas do espectro em frequência do sinal de excitação.
5. Em seguida, deve-se seguir o mesmo modelo analítico definido na seção anterior. Entretanto, a equação (3-46) deve ser modificada de forma a levar em conta o sinal negativo que κ pode assumir:

$$\hat{R}_m(\hat{r}_m, \hat{\alpha}_m) = A_m \sqrt{\frac{\pi}{2|\kappa|\hat{r}_m}} \frac{\sin\left(|\kappa|\frac{L}{2} \cos(\hat{\alpha}_m)\right)}{|\kappa| \cos(\hat{\alpha}_m)} e^{j(\kappa\hat{r}_m + \frac{\pi}{4})} \quad (3-51)$$

6. Ao aplicar (3-49) em (3-51), obtém-se a resposta de cada linha de fonte em função da frequência. Ao utilizar a equação (3-51) e seguindo as parametrizações apresentadas na seção 3, obtém-se os campos gerados por um único PPM em função da distância, r , do ângulo, α e da frequência, $R_p(r, \alpha, f)$. De forma a obter a resposta em frequência para cada PPM quando utilizado o sinal *burst* senoidal como entrada, os sinais de entrada $x_1(t)$ e $x_2(t)$ são multiplicados, no domínio da frequência, pelas respostas de cada PPM equivalente:

$$Y_1(r, \alpha, f) = R_1(r, \alpha, f) \cdot X_1(f) \quad , \quad (3-52)$$

$$Y_2(r, \alpha, f) = R_2(r, \alpha, f) \cdot X_2(f) \quad . \quad (3-53)$$

Como o sistema é linear, a resposta final, em frequência para os sinais de entrada $X_1(f)$ e $X_2(f)$ é dada pela soma de (3-52) e (3-53):

$$Y(r, \alpha, f) = Y_1(f) + Y_2(f) \quad (3-54)$$

7. Para obter a resposta do PPM EMAT duplo no tempo, aplica-se a transformada de Fourier inversa:

$$y(r, \alpha, t) = \mathcal{F}^{-1}\{Y(r, \alpha, f)\} \quad (3-55)$$

As respostas no tempo de cada PPM EMAT também podem ser obtidas da mesma forma, aplicando a transformada de Fourier inversa em $Y_1(r, \alpha, f)$ e $Y_2(r, \alpha, f)$.

8. Por último, para obter o diagrama de radiação do PPM EMAT duplo, deve-se retirar o valor pico a pico da resposta temporal, $y(t)$, para cada ângulo α e normalizar os valores pelo máximo.

Seguindo esses passos é possível não somente obter o diagrama de radiação de um PPM EMAT duplo, como também obter a sua resposta no tempo para diferentes sinais de excitação, em função da distância e do ângulo de medição, permitindo comparação direta com valores experimentais.

4

Avaliação Experimental

Nesse capítulo, é apresentado o processo de construção do *Side-Shifted PPM EMAT* e o setup experimental utilizado. O dispositivo *Side-Shifted PPM EMAT* pode ser separado em duas partes, a saber, bobinas e o duplo arranjo de ímãs.

4.1

Fabricação do *Side-Shifted PPM EMAT*

4.1.1

Bobinas

As bobinas foram desenvolvidas para serem do tipo *multi-lap racetrack*, como explicado na seção 2.3.2. Com relação às suas tecnologias de fabricação, elas podem ser divididas de duas formas, as bobinas fabricadas manualmente e as bobinas fabricadas em placas de circuito impresso (PCB) flexíveis.

4.1.1.1

Bobinas Manuais

As bobinas manuais foram feitas a partir de fios de cobre esmaltado 30 AWG, ou seja, com 0.254 mm de diâmetro de seção transversal. Após enrolar duas bobinas do tipo *multi-lap racetrack*, elas devem ser coladas uma por cima da outra, ou "sanduichadas", de forma a alinhar as seções retas. Todo esse processo deve ser feito com precisão, porque, caso as espiras não estejam paralelas entre si e a distância entre as seções retas não seja exatamente, ou muito próxima, da planejada, o dispositivo final pode não apresentar a radiação unidirecional esperada. O processo de fabricação das bobinas manuais foi feito com ajuda do aluno de Iniciação Científica, Iury Martins. Um exemplo de bobina manual finalizada, com separação lateral $D = 3$ mm, é apresentado na Figura 4.1. Ao final, os terminais de cada bobina devem ser soldados a conectores do tipo BNC, para posterior conexão com o amplificador de potência. Os conectores devem ser soldados com atenção à polaridade da corrente na bobina, porque ela é determinante no sentido da Força de Lorentz e no sinal da

onda gerada por cada bobina, consequentemente, no processo de interferência que produz a geração unidirecional.

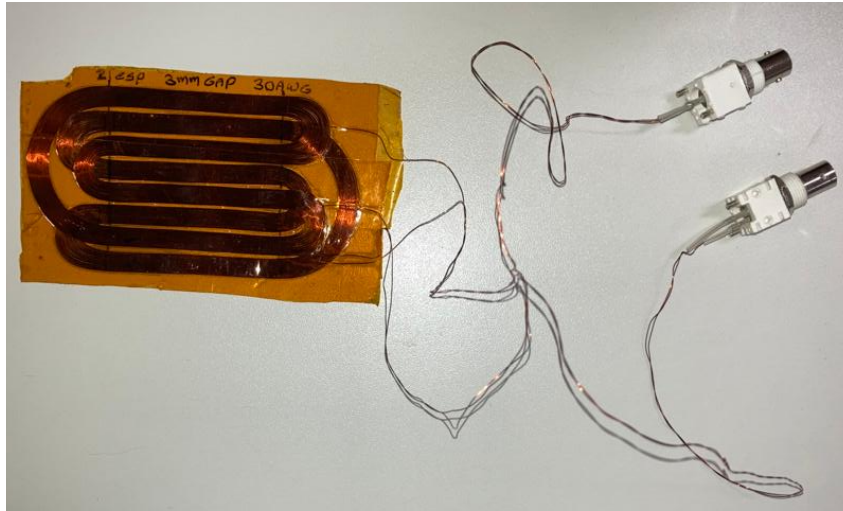


Figura 4.1: Bobina manual do tipo *multi-lap racetrack coil* com os fios já soldados aos conectores do tipo BNC.

4.1.1.2

Bobinas em PCBs Flexíveis

As bobinas impressas em placas de circuito impresso flexíveis também foram divididas em duas metades, de forma similar às bobinas manuais. Essas foram modeladas através do programa Eagle® e fabricadas junto à empresa especializada. Os materiais escolhidos para as PCBs foram a poliamida e o poliéster. Esses foram escolhidos por suas pequenas espessuras de $75\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$, respectivamente, o que fez as bobinas, mesmo após prontas, apresentarem pequeno *lift-off*, principalmente as feitas com poliéster. Devido às limitações de fabricação das PCBs, a largura mínima dos trilhas e o espaçamento mínimo entre trilhas das bobinas (seções retas de cobre) foram definidas em aproximadamente 0.2 mm, para ambas as direções.

A Figura 4.2 apresenta os modelos criados para bobinas com separação lateral $D = 3\ \text{mm}$. Após serem impressas, os terminais das bobinas em PCB precisam ser conectados, através de um processo de solda chamado *wire-up*. Esse se consiste em soldar um fio fino, do terminal que fica ao fim da bobina impressa, ao terminal a ser conectado ao conector BNC. Esse processo é necessário porque a fabricação das bobinas em PCB é feita em somente uma face da folha. Os terminais a serem conectados pelo *wire-up* são destacados pelos círculos vermelhos na Figura 4.2. O processo de solda *wire-up* foi feito pelo técnico do CPTI, Carlos Sampaio. A Figura 4.3 apresenta duas bobinas, de

poliéster (a) e poliamida (b), para um *Side-Shifted PPM EMAT* de separação lateral $D = 2$ mm.

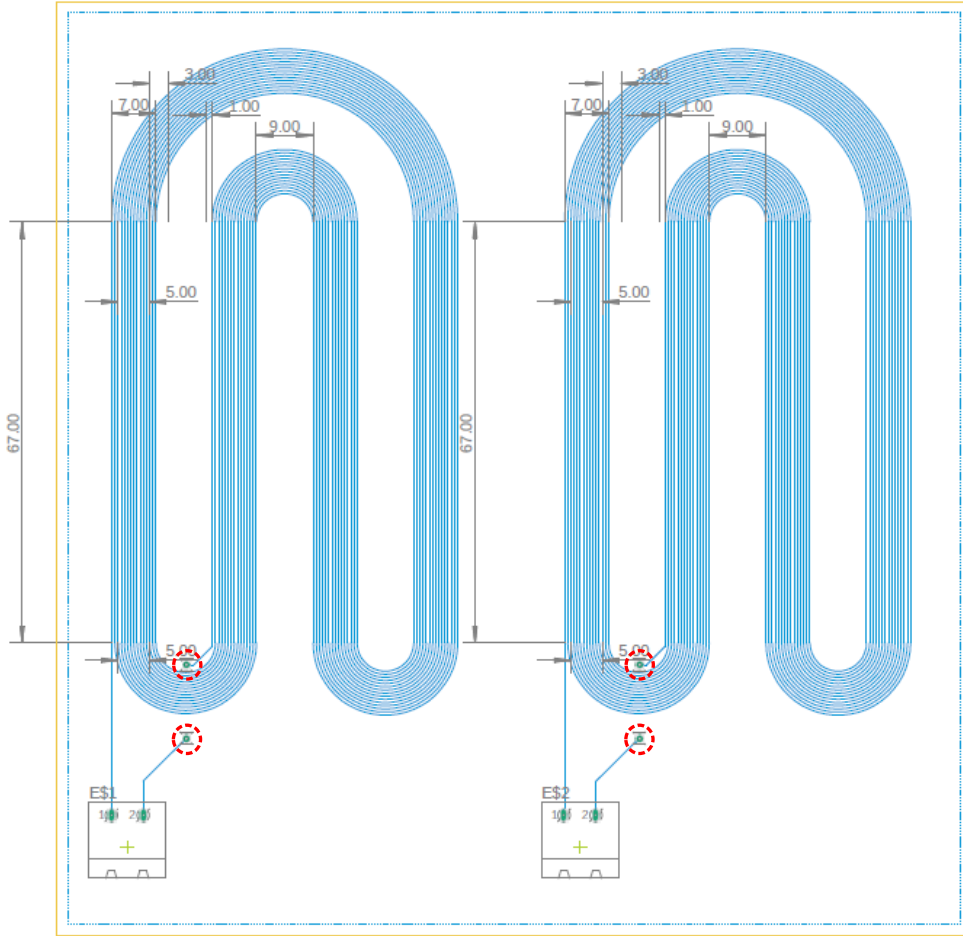


Figura 4.2: Modelo de bobina *multi-lap racetrack coil* que formarão o *Side-Shifted PPM EMAT*, desenvolvido para impressão em PCB.

O processo de montagem, ou "sandwichamento", das bobinas em PCB foi diferente para cada material trabalhado. Como é importante que cada seção reta das bobinas *multi-lap racetrack coil* estejam aproximadamente na mesma altura, de forma a evitar o efeito de *lift-off* [16, 19], a própria espessura das folhas deve ser levada em consideração no momento de montagem das bobinas. Dessa forma, para montagem das bobinas feitas com poliéster, cortou-se o espaço entre as seções retas das bobinas, correspondentes à distância d do *Side-Shifted PPM EMAT* (ver Figura 2.8). Na foto apresentada na Figura 4.3(a), por exemplo, esse espaço é a região marcada em vermelho. Depois de cortar essa região das duas bobinas a serem "sandwichadas", as mesmas são coladas em uma fita adesiva que passa por ambas as suas faces. Ao realizar essa etapa de corte e colagem a partir da fita adesiva, é garantido que as bobinas tenham, aproximadamente, a mesma altura em relação à placa metálica, dada

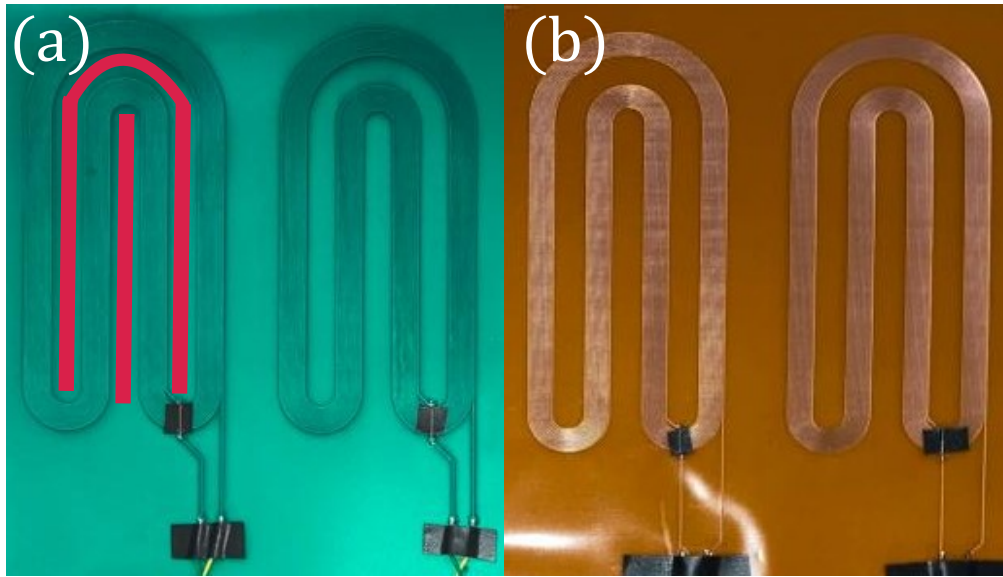


Figura 4.3: Fotografia das folhas impressas de poliéster (a) e poliamida (b) das bobinas com separação lateral $D = 2$ mm que já passaram pelo processo de soldagem *wire-up*. A região vermelha destacada representa a área que deve ser cortada durante o processo de montagem da bobina de poliéster.

apenas pela espessura da fita adesiva utilizada. Entretanto, esse processo é não trivial, porque os cortes dos espaços entre as vias devem ser precisos, de forma a não cortar uma via e, conseqüentemente, estragar a bobina, e não deixar grandes pedaços de poliéster sobressalentes. A colagem das duas bobinas separadas também deve ser feita com muito cuidado, porque é fácil entortar as folhas das bobinas e não manter as seções retas das vias completamente paralelas, o que afeta, mesmo que levemente, a radiação do *Side-Shifted PPM EMAT*.

As bobinas feitas a partir de poliamida, entretanto, não apresentaram essa dificuldade, dado que o processo de "sandwichamento" delas foi mais simples. Como as folhas de poliamida são mais finas do que as de poliéster, o efeito de *lift-off* causado pela espessura das folhas pôde ser desconsiderado. Logo, a colagem das duas bobinas foi feita através de uma fita adesiva dupla-face posicionada entre ambas. Outro motivo para a simplificação desse processo é que a folha de poliamida é mais flexível e frágil que a de poliéster, portanto o processo de cortar o material entre as vias das bobinas, explicado acima, seria ainda mais complicado, correndo o risco de se perder diversas bobinas com o menor erro de corte. Depois de serem coladas, os terminais das bobinas devem ser soldados em conectores do tipo BNC, da mesma forma que as bobinas manuais. A Figura 4.4 exibe uma bobina de poliéster e uma de poliamida finalizadas.

Ao final, foram feitas quatro bobinas em PCB por material, com separação

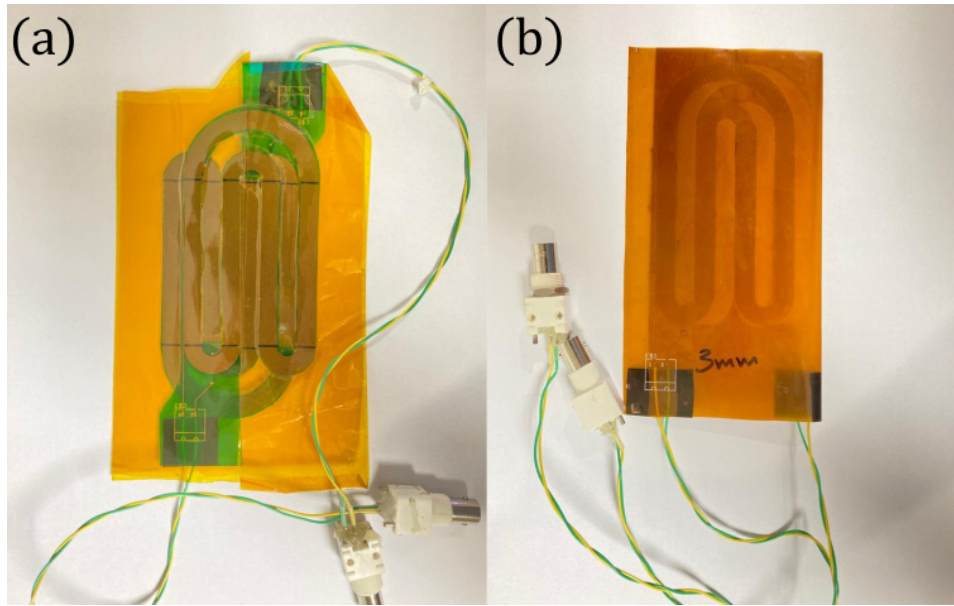


Figura 4.4: Bobinas em PCB flexível de poliéster (a) e poliamida (b) já montadas e soldadas aos conectores BNC.

lateral, D , variando de 1 mm a 4 mm. Diferente das bobinas manuais, que não puderam ser feitas com separação lateral de 1 mm porque não foi possível garantir tal precisão de fabricação para valores de D menores que 2 mm.

4.1.2

Arranjo de Ímãs

Os moldes para os arranjos de ímãs que constituem os dual-PPMs foram desenvolvidos no software CAD OnShape® e impressos em impressora 3D com plástico ABS. O processo de modelagem e impressão do moldes para os ímãs foi feito com a ajuda do aluno de Iniciação Científica, Iury Martins, e do mestrando João Pedro de Andrade. A Figura 4.5 apresenta moldes feitos para dual-PPMs de separação lateral entre fileiras fixa em $D = 3$ mm, e número de fileiras de ímãs por PPM, $Q = 2$ (a) e $Q = 3$ (b).

Após serem impressos, eles foram preenchidos com ímãs de neodímio de dimensões $5 \times 5 \times 5$ mm e gradação magnética de N50, de forma a manter as configurações para os *Side-Shifted PPM EMATs* de $w = L = 5$ mm, conforme mencionado na seção 2.3. Os ímãs foram colocados nos vãos delimitados do molde e presos com uma fita adesiva ao longo do molde. A Figura 4.6 apresenta 4 diferentes moldes, já preenchidos, para PPMs com separação entre fileiras $D = 3$ mm.

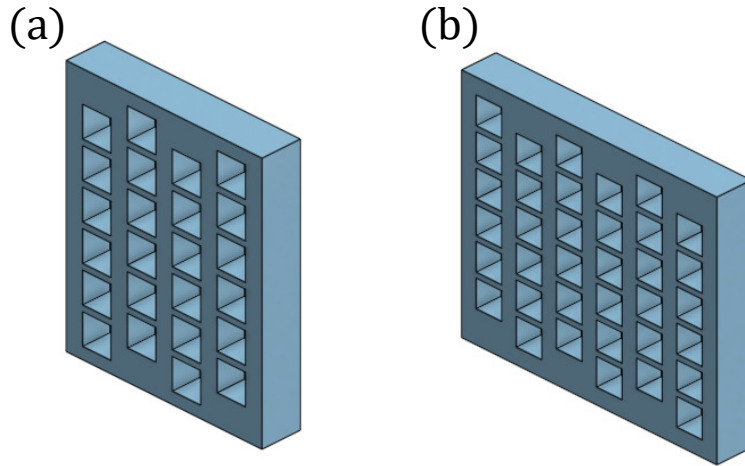


Figura 4.5: Modelo criado no programa OnShape para PPMs de configuração $D = 3$ mm e $Q = 2$ (a) e $Q = 3$ (b) fileiras de ímãs por PPM.

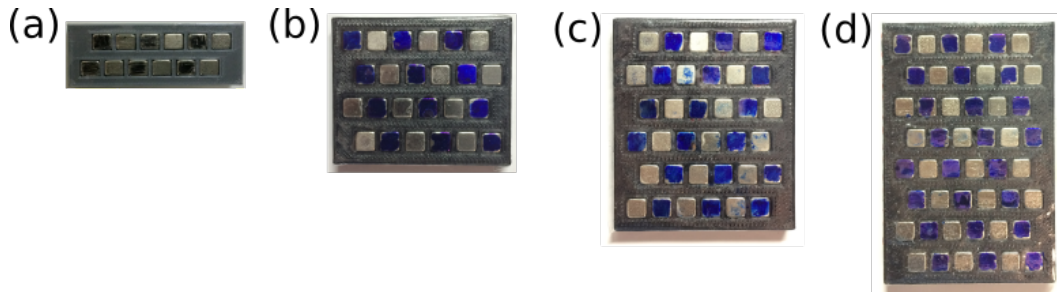


Figura 4.6: Moldes preenchidos para PPMs de separação lateral $D = 3$ mm e número de fileiras de ímãs por PPM, $Q = 1$ (a), $Q = 2$ (b), $Q = 3$ (c) e $Q = 4$ (d). Faces pintadas representam uma polaridade, seja ela Norte ou Sul, enquanto faces cinzas representam a polaridade inversa, baseado em [56].

4.2

Setup Experimental

As medições experimentais foram realizadas no laboratório do Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção (CPTI) da PUC-Rio. Os equipamentos utilizados para realizar as medidas são listados abaixo:

1. Gerador de Sinais: Um gerador de sinais aleatórios e sincronizados da Tektronix®, modelo AFG31000, capaz de produzir duas saídas diferentes. Nesse trabalho, as saídas foram do tipo *burst* senoidal, com frequência central de 259 kHz e defasados de 90° .
2. Amplificador de Potência: No total, dois amplificadores de potência de banda larga da Electronics & Innovation® modelo 2100L foram utilizados, um para cada sinal de excitação.

3. *Side-shifted PPM EMAT*: Os dispositivos unidirecionais desenvolvidos foram colocados ao centro de uma placa de alumínio de 1.5 mm de espessura, 1 m de largura e 2 m de comprimento, com suas bobinas sendo excitadas pelos sinais, já amplificados, de forma a transmitir as ondas ultrassônicas em padrão unidirecional.
4. PPM EMAT Comercial: Um PPM EMAT da Sonematd Ltd., modelo SHD1031S de 3 ciclos espaciais, com frequência nominal de 10 mm foi utilizado como receptor. O mesmo foi posicionado a uma distância fixa de 275 mm do transmissor e em diversos ângulos de recepção, α , do centro do *Side-shifted PPM EMAT*. O lóbulo frontal de radiação do dispositivo foi medido em passos de 5°, a saber, $\alpha = [340^\circ, 345^\circ, 350^\circ, 355^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ]$, de forma a melhor visualizar o lóbulo frontal de radiação do dispositivo. Os outros ângulos de recepção foram medidos em passos de 10°. Totalizando 40 medições angulares para cada dispositivo testado.
5. Amplificador de Recepção: O aparelho RITEC® RPR-4000 foi utilizado para amplificar o sinal de recepção em 54 dB e filtrar o sinal com filtros passa-baixa e passa-alta centrados em 800 mm e 200 mm, respectivamente.
6. Osciloscópio: Um osciloscópio digital da Tektronix®, modelo DPO 4054, foi utilizado para visualizar o sinal de recepção e capturar as formas de onda, transmitindo-as para um computador.

De forma resumida, o gerador de sinais tem suas saídas ligadas aos amplificadores de potência; a seguir, os sinais de excitação amplificados são ligados ao *Side-Shifted PPM EMAT*; o mesmo gera ondas ultrassônicas que são recebidas pelo PPM EMAT comercial, sendo filtradas e amplificadas pelo amplificador de recepção; por último, essas formas de onda são visualizadas em um osciloscópio digital que as salva e transfere para um computador.

A Figura 4.7 apresenta um esquemático da organização experimental feita com os equipamentos de forma a gerar ondas SH em uma placa de alumínio de 1.5 mm de espessura. Enquanto a Figura 4.8 apresenta uma fotografia feita durante uma medição.

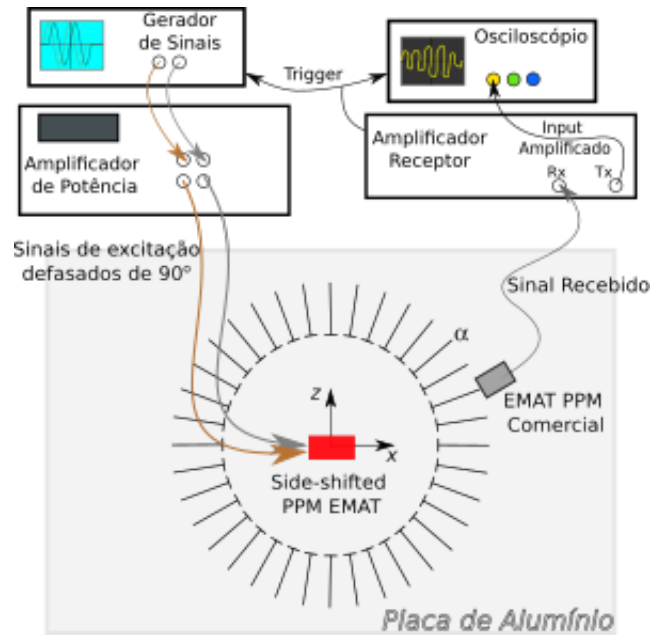


Figura 4.7: Representação esquemática do setup experimental, baseada em [56]. Dois sinais *burst* senoidais defasados de 90° são criados pelo gerador de sinais aleatórios e amplificados antes de serem aplicados no *Side-shifted PPM EMAT* (caixa vermelha) de forma a gerar ondas SH em uma placa de alumínio de 1.5 mm de espessura. Essas ondas são recebidas por um EMAT PPM comercial da Sonemat Ltd. O sinal recebido é amplificado antes de ser lido em um osciloscópio digital, onde sua forma de onda é transferida para um computador.

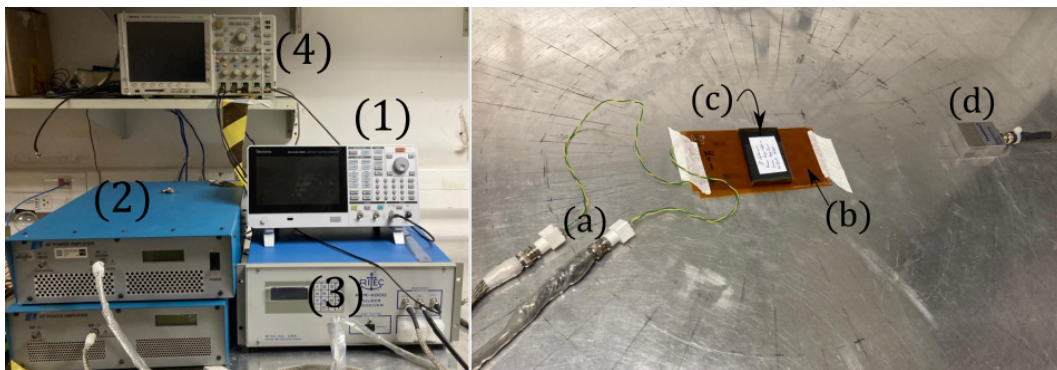


Figura 4.8: Fotografia dos equipamentos e montagem utilizados em uma medição com o *Side-shifted PPM EMAT*. À esquerda, (1) é o gerador de sinais, (2) são os amplificadores de potência, (3) é o amplificador de recepção e (4) é o osciloscópio digital. À direita, os cabos de alimentação (a) se ligam à bobina de poliamida (b) com o dual-PPM (c) que é posicionado acima. As ondas transmitidas pela placa metálica são lidas pelo PPM EMAT receptor comercial (d).

5 Resultados

Nesse capítulo, são apresentados e comparados os resultados obtidos a partir das simulações através dos modelos *Continuous Wave* e *Time Domain* com os resultados experimentais, seguindo a montagem apresentada na seção 4.2. Primeiramente, é feita uma breve introdução dos primeiros resultados numéricos obtidos de forma a validar os modelos desenvolvidos. Em seguida, os resultados experimentais, obtidos ao variar Q , o número de fileiras de ímãs por PPM, e D , a separação lateral entre as fileiras de ímãs, com os três tipos diferentes de bobinas testadas, são apresentados e comparados com resultados numéricos a partir do modelo *TD*. Na última seção desse capítulo, os resultados experimentais são discutidos e comparados entre si, de forma a analisar as vantagens e desvantagens de cada configuração do PPM EMAT duplo.

5.1 Resultados Preliminares - Validação do Modelo

Inicialmente, o modelo apresentado na seção 3.3.1 foi utilizado para simular um PPM EMAT convencional, com configuração apresentada na Tabela 5.1. Esse dispositivo foi desenvolvido utilizando moldes similares aos apresentados na seção 4.1 e bobina em PCB rígida fabricada em uma fresa do laboratório CPTI.

λ	w	L	g	d
22 mm	20 mm	10 mm	1 mm	1 mm

Tabela 5.1: Parâmetros de construção do PPM EMAT convencional testado. λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, g é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e d é a separação lateral entre fileiras de ímãs do mesmo PPM.

Mesmo não sendo o foco desse trabalho, o código desenvolvido foi feito de forma a poder simular diferentes configurações de PPM EMATs, tornando-o mais robusto. O código desenvolvido para calcular o campo gerado pelo *Side-Shifted PPM EMAT*, ou um PPM EMAT convencional, também gera uma ilustração esquemática da configuração em questão, de forma a garantir que as configurações simuladas estejam corretas.

A Figura 5.1 apresenta o esquemático retornado pelo código (a) e o diagrama de radiação simulado (linha azul contínua) junto dos valores medidos experimentalmente (b) para um PPM EMAT convencional de configuração apresentada na Tabela 5.1. O processo de medição desse dispositivo foi similar ao descrito na seção 4.2, diferindo no uso de somente um sinal de excitação, dado que é um dispositivo convencional e no transdutor comercial utilizado como receptor. Nesse caso, foi usado o PPM EMAT SHD2531S da Sonemat®, que possui período espacial de 25 mm.

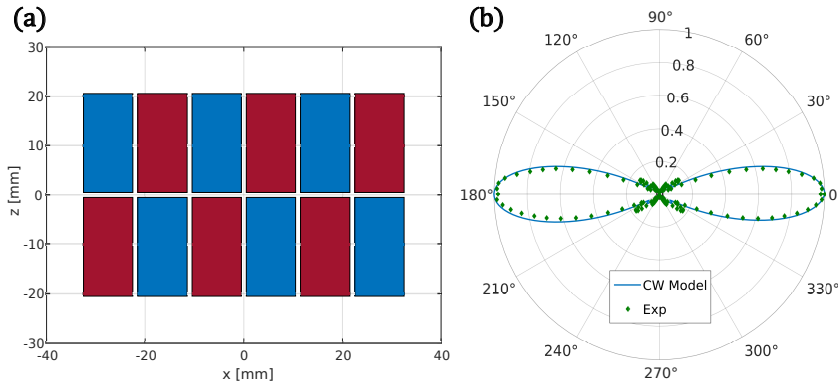


Figura 5.1: Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) de um PPM EMAT convencional, de $w = 20$ mm, $L = 10$ mm, $g = 1$ mm, $d = 1$ mm e $\lambda = 22$ mm. Símbolos verdes representam pontos experimentais e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW*.

Com a confirmação de que o modelo analítico desenvolvido é capaz de simular um PPM EMAT convencional, ele foi utilizado para simular PPM EMATs duplos, ou seja, dispositivos que contenham dois arranjos de ímãs independentes. Além do PPM EMAT convencional, apresentado acima, o modelo *CW* também foi usado para simular o PPM EMAT unidirecional do tipo *Dual-Linear Coil*, apresentado na seção 2.3.2, com configurações definidas na Tabela 5.2. O esquemático e o diagrama de radiação, simulado através do modelo *CW*, junto dos resultados experimentais originais e da simulação através de elementos finitos (FEM), são apresentados na Figura 5.2 (a) e (b), respectivamente. A simulação através de elementos finitos foi feita utilizando o programa OnScale®, utilizando de um conjunto de densidade de forças aplicadas em regiões correspondentes à área de cada ímã do EMAT sobre a superfície de uma placa de alumínio com 1.5 mm de espessura modelada. Cada densidade de força é então modulada por um sinal variante no tempo correspondente ao pulso de excitação de cada PPM com o atraso adequado a fim de se gerar ondas SH de maneira unidirecional. O campo de velocidade de partícula correspondente à polarização SH foi então adquirido a uma distância fixa do centro de geração a fim de se computar o diagrama de radiação das

ondas geradas por cada configuração. O resultados da FEM foram retirados de [32], para fins de validação do modelo desenvolvido.

λ	w	L	G	d
25 mm	16 mm	4 mm	2.2 mm	4.5 mm

Tabela 5.2: Parâmetros de construção do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*. λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, G é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e d é a separação lateral entre fileiras de ímãs do mesmo PPM.

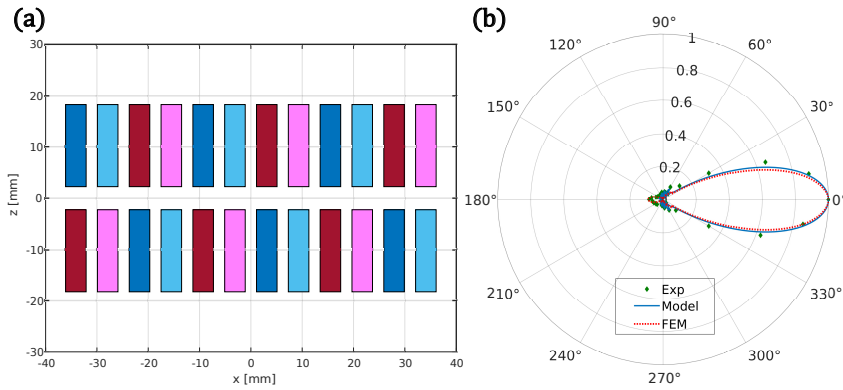


Figura 5.2: Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) do *Dual-Linear Coil PPM EMAT*, apresentado em [32]. Símbolos verdes representam pontos experimentais, a linha tracejada vermelha é a simulação em elementos finitos e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW*.

Por fim, Figura 5.3 (a) apresenta o esquemático retornado pelo código desenvolvido para simular o *Side-Shifted PPM EMAT* original, desenvolvido em [31], com configurações definidas na Tabela 5.3. O diagrama de radiação, obtido através do modelo *CW*, é apresentado em (b), junto dos resultados experimentais originais e da simulação através de elementos finitos (FEM). Essa última foi retirada diretamente de [31], para fins de validação do modelo desenvolvido.

λ	w	L	g	D	Q
12 mm	5 mm	5 mm	1 mm	3 mm	2

Tabela 5.3: Parâmetros de construção do *Side-Shifted PPM EMAT* original. λ é o comprimento de onda nominal do dispositivo, w é a largura do ímã, L é o comprimento do ímã, g é a separação longitudinal entre ímãs da mesma fileira e D é a separação lateral entre diferentes fileiras de ímãs.

É possível ver que o modelo *CW* apresenta boa concordância com os resultados experimentais e com a simulação através de elementos finitos. É importante ressaltar que o modelo analítico desenvolvido é mais eficiente em

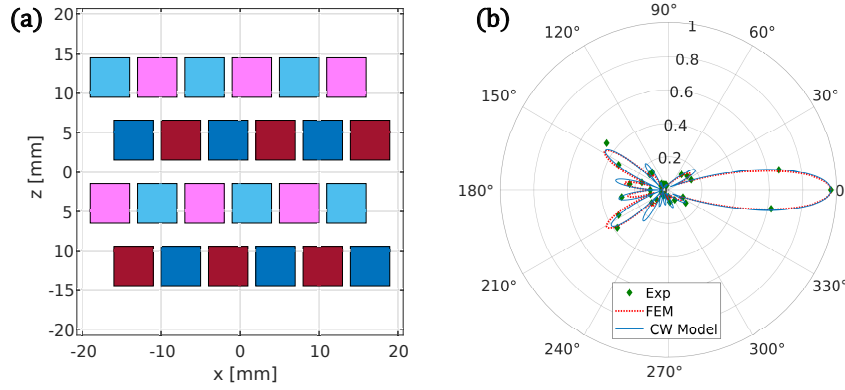


Figura 5.3: Esquemático (a) e diagrama de radiação (b) de um *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $Q = 2$, $D = 3$ mm, $w = L = 5$ mm e $g = 1$ mm, apresentado inicialmente em [31]. Símbolos verdes representam pontos experimentais, a linha tracejada vermelha é a simulação em elementos finitos e a linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo analítico *CW*.

simular dispositivos do tipo PPM EMAT, quando o objetivo é calcular o diagrama de radiação, não sendo tão custoso computacionalmente quanto a simulação por elementos finitos. As maiores diferenças estão presentes nas regiões de lóbulos traseiros, ou seja, na região $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$. Tais resultados validaram a modelagem analítica. Entretanto, como explicado na seção 3.3.2, o modelo *CW* ainda poderia ser aprimorado ao considerar toda a banda de frequência trabalhada ao excitar um dispositivo do tipo PPM EMAT com *bursts* senoidais.

Ao utilizar o modelo completo, *TD*, obtém-se primeiramente as ondas ultrassônicas propagantes simuladas em uma distância r da origem. Calculando o valor pico a pico das ondas normalizadas, obtém-se o diagrama de radiação através do modelo *TD*. As ondas simuladas para o *Side-Shifted PPM EMAT* definido na Tabela 5.3 são apresentadas na Figura 5.4 em linha vermelha contínua, mostrando boa concordância com as formas de onda medidas experimentalmente (linha azul contínua). As pequenas diferenças entre as ondas simuladas e medidas experimentalmente se devem, principalmente, ao fato do modelo *TD* não levar em conta o comportamento do dispositivo receptor, que, dependendo do dispositivo utilizado, pode alterar as formas de onda recebidas [57]. Além disso, deve-se salientar que, o modelo *TD* assume comportamento em campo distante para todas as componentes em frequência do espectro contidas no pulso de excitação. Isso não é estritamente verdade para todas as componentes em frequência, sendo uma limitação da aproximação adotada.

O diagrama de radiação simulado a partir do modelo *TD* é apresentado na Figura 5.5 em linha contínua vermelha. Ao comparar-se os dois modelos, *Continuous Wave* e *Time Domain*, percebe-se que, ao usar a simulação que

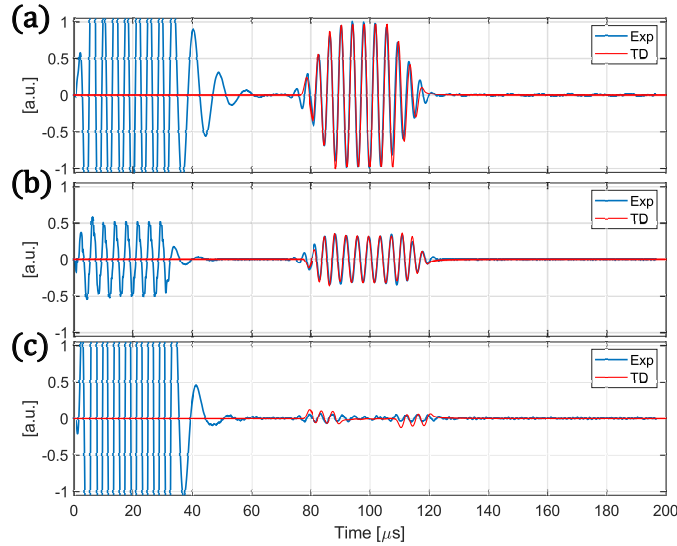


Figura 5.4: Sinais experimentais (linhas azuis) e simulados (linhas vermelhas) através do modelo TD em $\alpha = 0^\circ$ (a), $\alpha = 140^\circ$ e $\alpha = 180^\circ$ (c). O sinal de grande amplitude para tempos menores que $60 \mu s$ é a interferência eletromagnética dos equipamentos. Esse não afeta as formas de onda de interesse, porque chegam depois do sinal de interferência.

considera todo o domínio em frequência, os lóbulos traseiros laterais apresentam valores levemente superiores no modelo TD . Os pontos onde diagrama de radiação é praticamente nulo, com o modelo CW , apresentam valores mais elevados, um exemplo é a região de $120^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$. Isso ocorre porque na versão CW , há apenas uma componente na frequência nominal, $f_c = c_t/\lambda$, todavia, na versão TD , excita-se com sinais que possuem uma banda de frequências, aqui considerado como um *burst* senoidal de 8 ciclos centrado em $f_c = 259 \text{ kHz}$. Assim sendo, o mecanismo de interferência destrutiva através do deslocamento longitudinal dos PPMs não é ideal para as componentes em frequência diferentes de f_c . Quando comparado aos valores experimentais, o modelo TD apresenta menores erros, uma vez que considera o mesmo sinal de excitação utilizado na etapa experimental. Tornando o uso do modelo TD mais indicado para comparar e analisar diversas configurações de *Side-Shifted PPM EMATs*. Ou seja, o procedimento aplicado ao modelo TD segue o procedimento experimental para se obter o diagrama de radiação de um dispositivo PPM EMAT; primeiramente obtém-se as formas de onda em um ponto de medição, depois compara-se com outras formas de onda obtidas em diferentes ângulos de interesse.

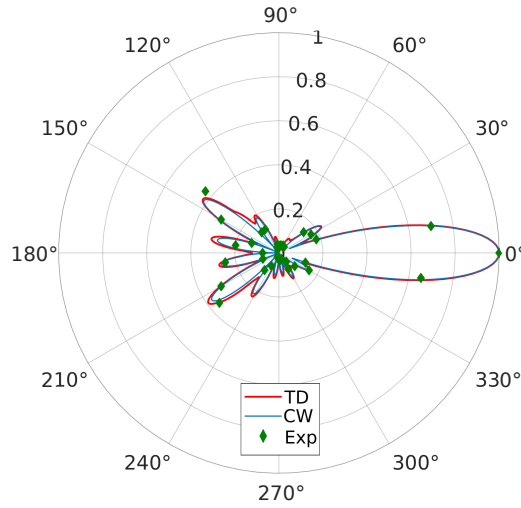


Figura 5.5: Diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* apresentado em [31]. A linha azul contínua é a simulação feita usando o modelo *CW* enquanto a vermelha foi obtida através do modelo *TD*, o qual considera a banda do sinal de excitação.

5.2

Resultados das Novas Configurações do Side-Shifted PPM EMAT

A seguir, são apresentados, os diagramas de radiação obtidos com as bobinas manuais e com as bobinas em PCB de cada configuração fabricada do *Side-Shifted PPM EMAT*, sendo todos comparados aos diagramas teóricos obtidos através do modelo *Time Domain*. Os diagramas experimentais são obtidos ao retirar o valor pico a pico das formas de onda normalizadas pelo máximo, em $\alpha = 0$, de cada configuração, similares às apresentadas na Figura 5.4 (linhas azuis contínuas). Ou seja,

$$\bar{V}_{\alpha}^E = \frac{V_{\alpha}^E}{V_{\alpha=0}^E}, \quad (5-1)$$

onde \bar{V}_{α}^E é o valor pico a pico experimental, no ângulo de medição α , normalizado pelo valor pico a pico medido em $\alpha = 0$, $V_{\alpha=0}^E$.

Os resultados são divididos pelo número de fileiras por arranjo de PPM, parâmetro Q . É importante lembrar que, para $D = 1$ mm somente as bobinas em PCB foram fabricadas, portanto, nesses casos não são apresentados resultados com as bobinas manuais.

5.2.1

$Q = 1$ Fileiras de Ímãs

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 exibem os esquemáticos e diagramas de radiação dos *Side-Shifted PPM EMATs* construídos com $Q = 1$ fileiras de ímãs por PPM.

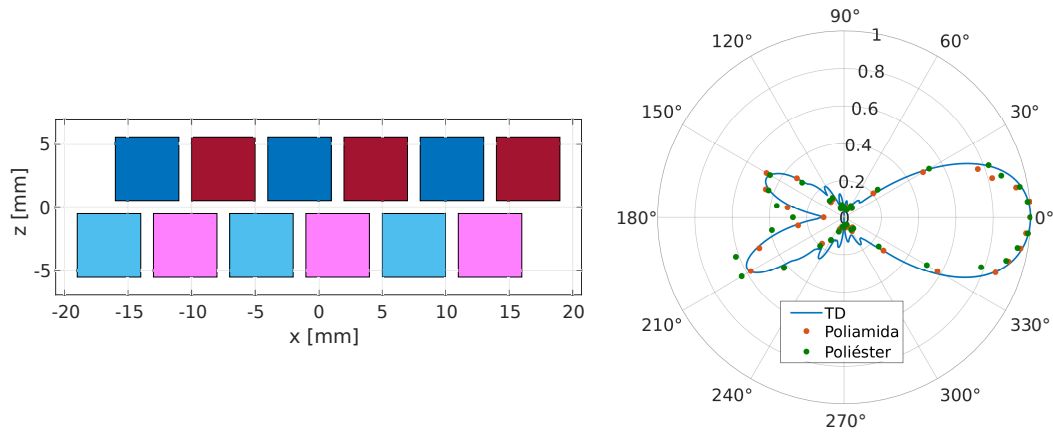


Figura 5.6: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

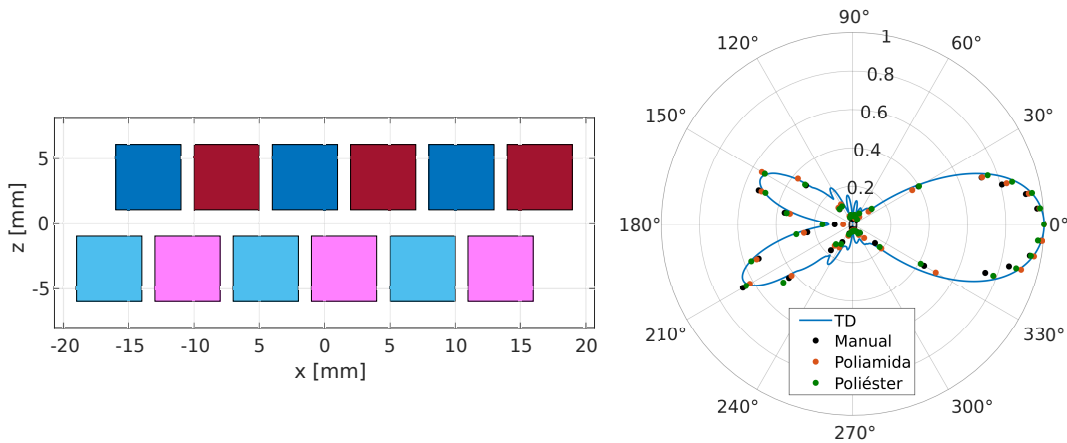


Figura 5.7: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

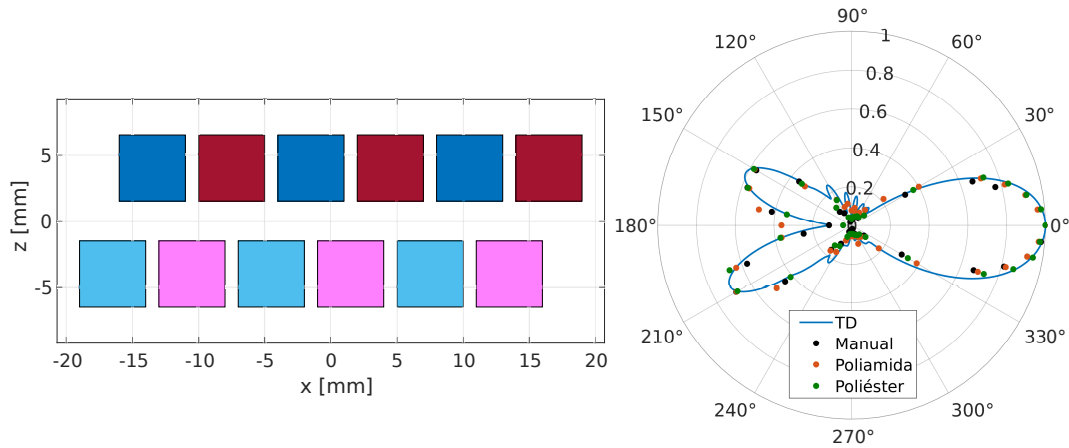


Figura 5.8: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

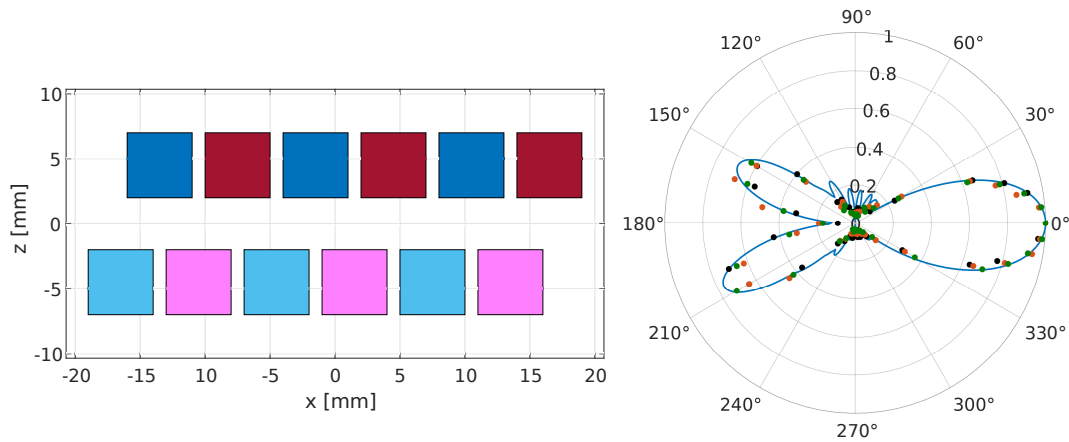


Figura 5.9: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 1$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

5.2.2

 $Q = 2$ Fileiras de Ímãs

As Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 exibem os esquemáticos e diagramas de radiação dos *Side-Shifted PPM EMATs* construídos com $Q = 2$ fileiras de ímãs por PPM.

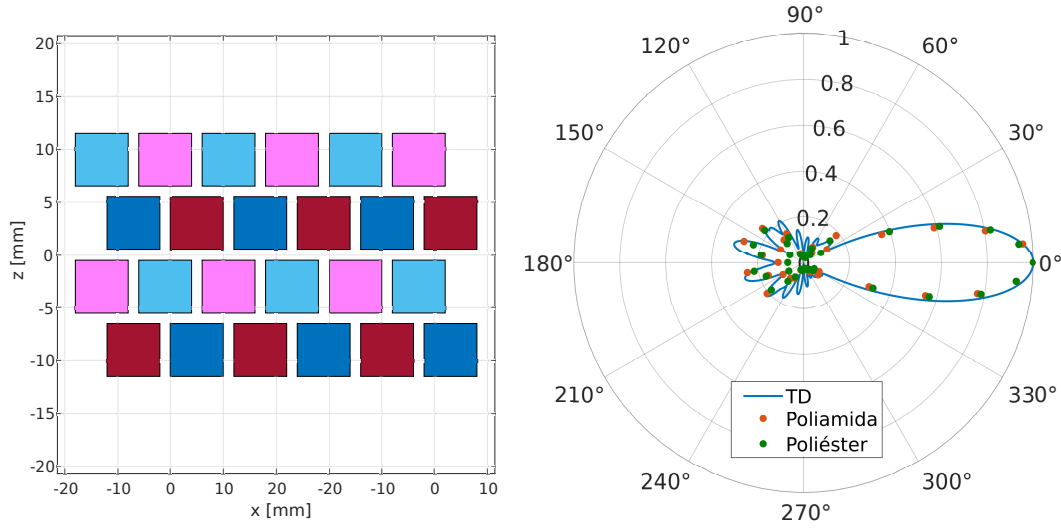


Figura 5.10: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

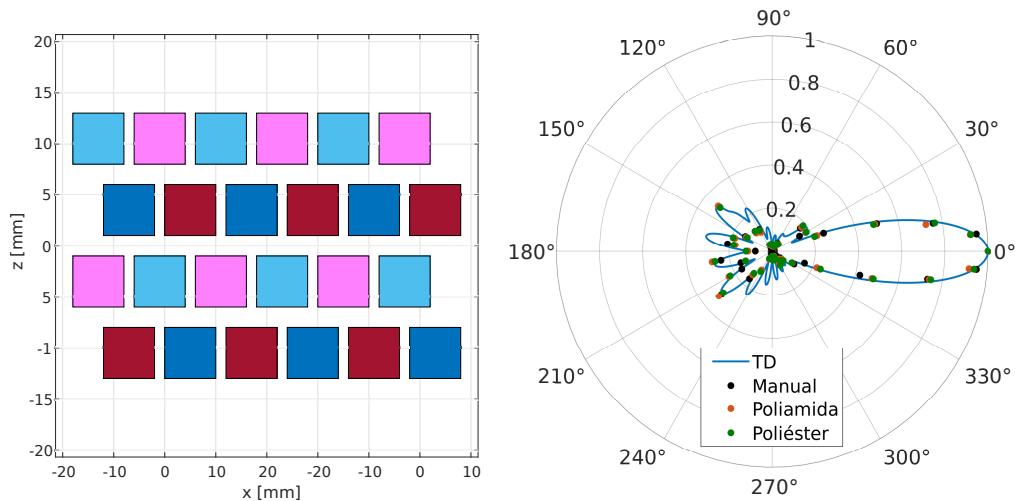


Figura 5.11: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

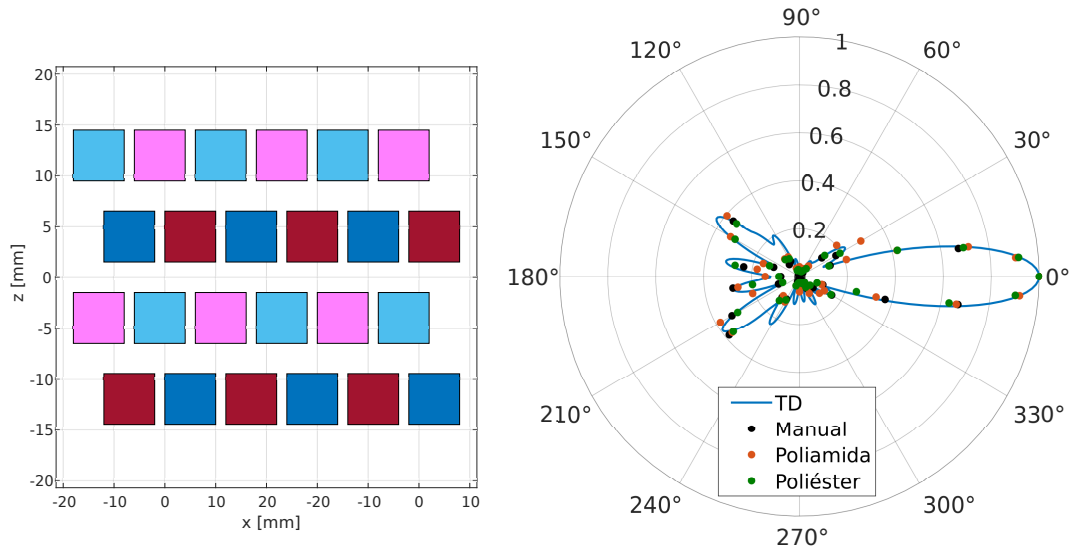


Figura 5.12: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

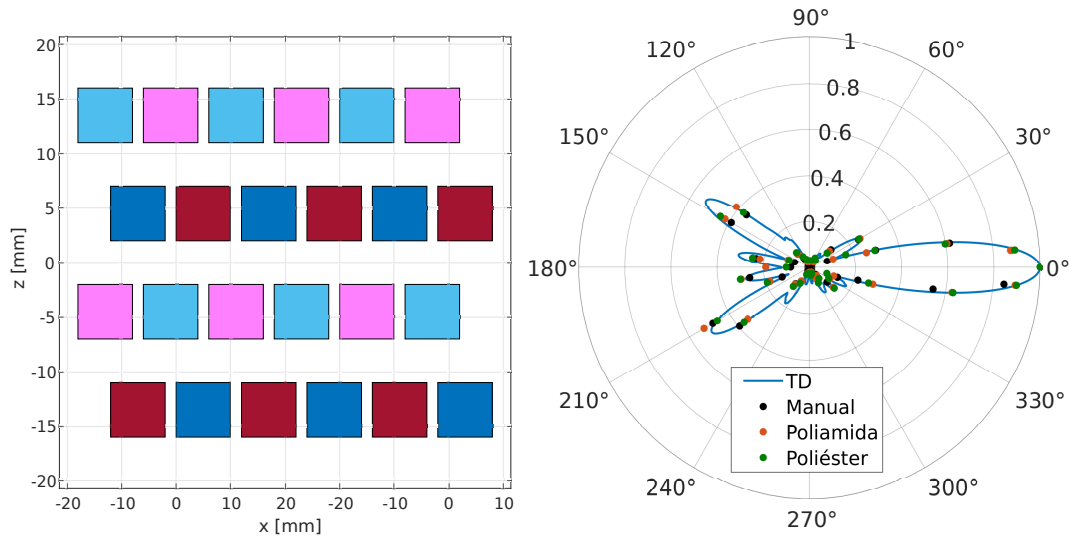


Figura 5.13: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 2$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

5.2.3

$Q = 3$ Fileiras de Ímãs

As Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 exibem os esquemáticos e diagramas de radiação dos *Side-Shifted PPM EMATs* construídos com $Q = 3$ fileiras de ímãs

por PPM.

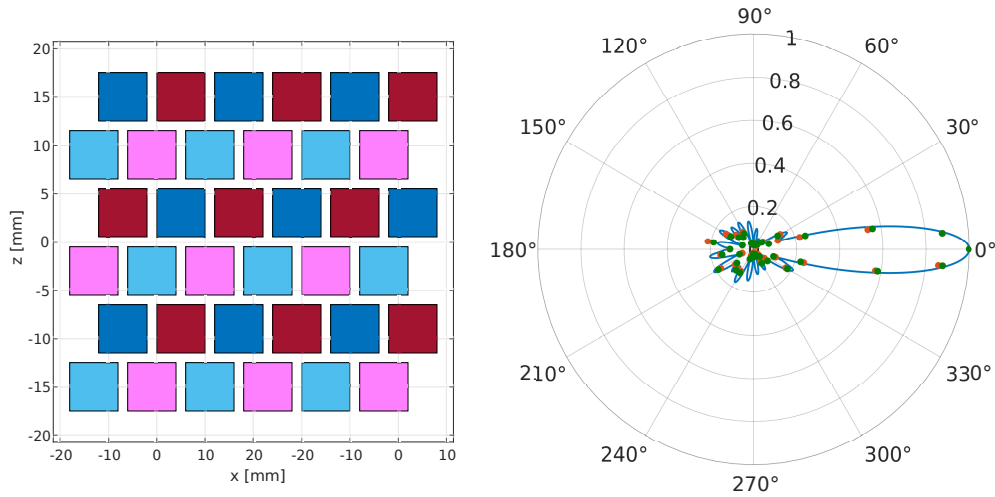


Figura 5.14: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

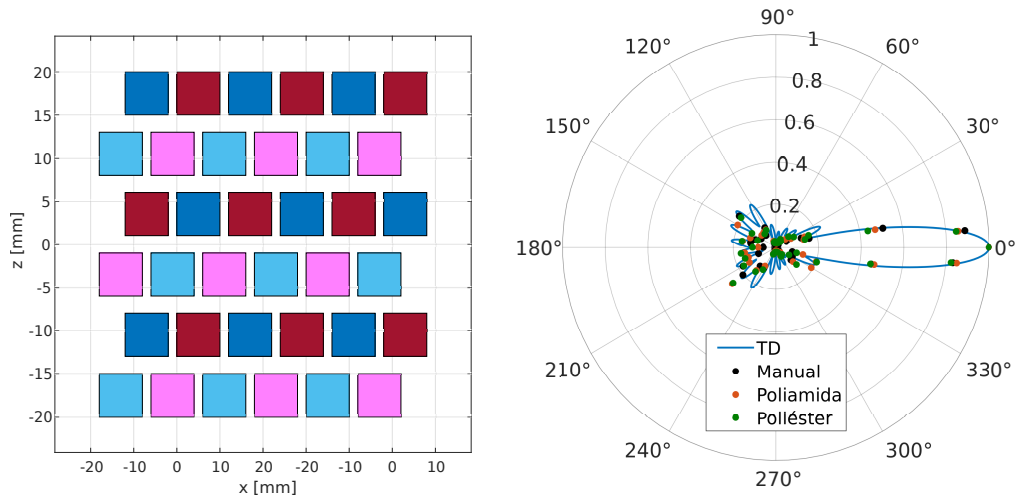


Figura 5.15: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

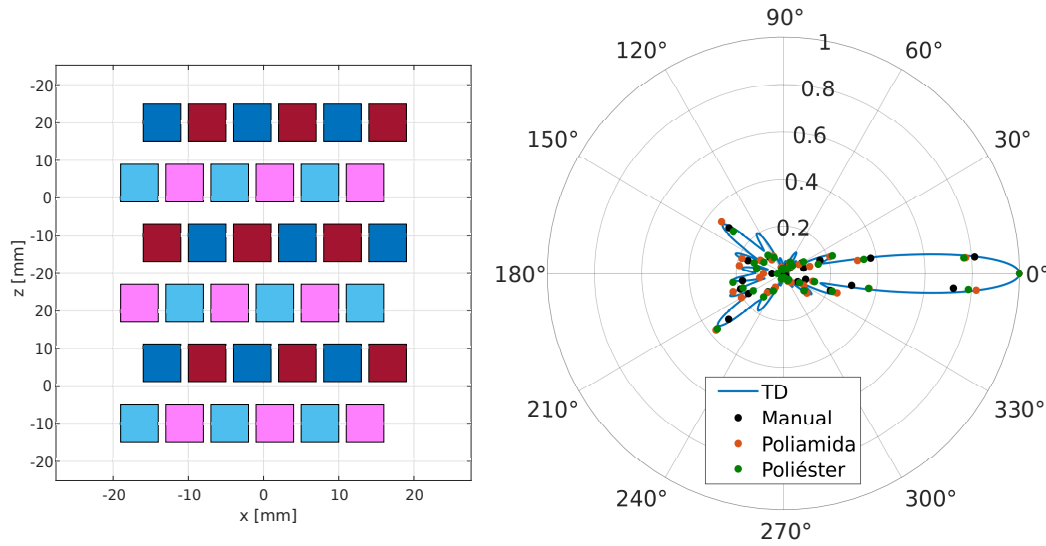


Figura 5.16: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

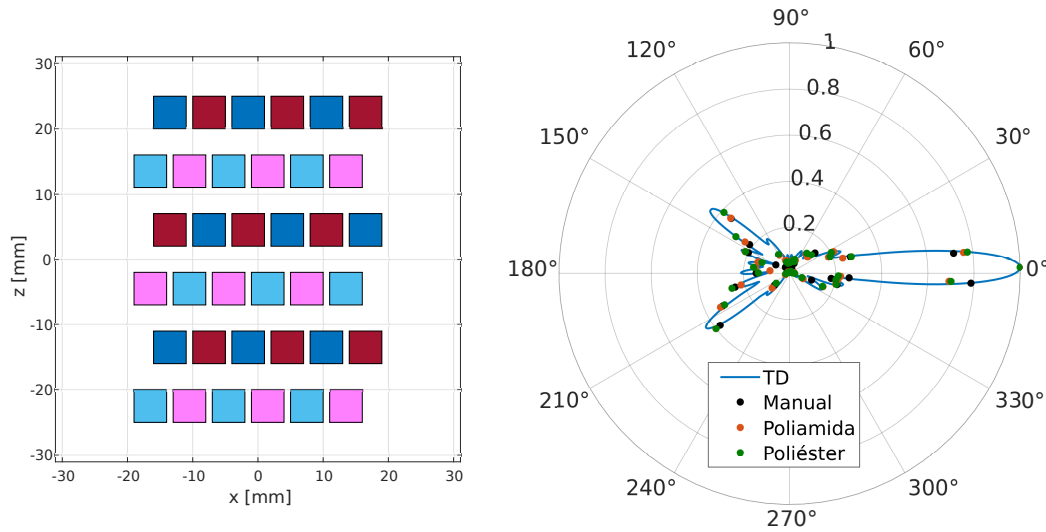


Figura 5.17: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 3$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

5.2.4

$Q = 4$ Fileiras de Ímãs

As Figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 exibem os esquemáticos e diagramas de radiação dos *Side-Shifted PPM EMATs* construídos com $Q = 4$ fileiras de ímãs por PPM.

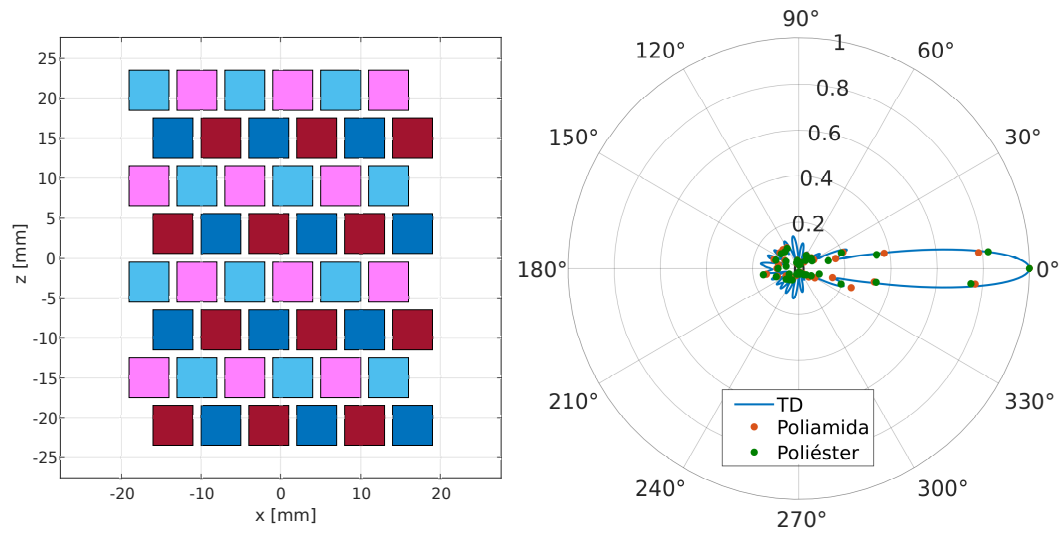


Figura 5.18: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 1$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

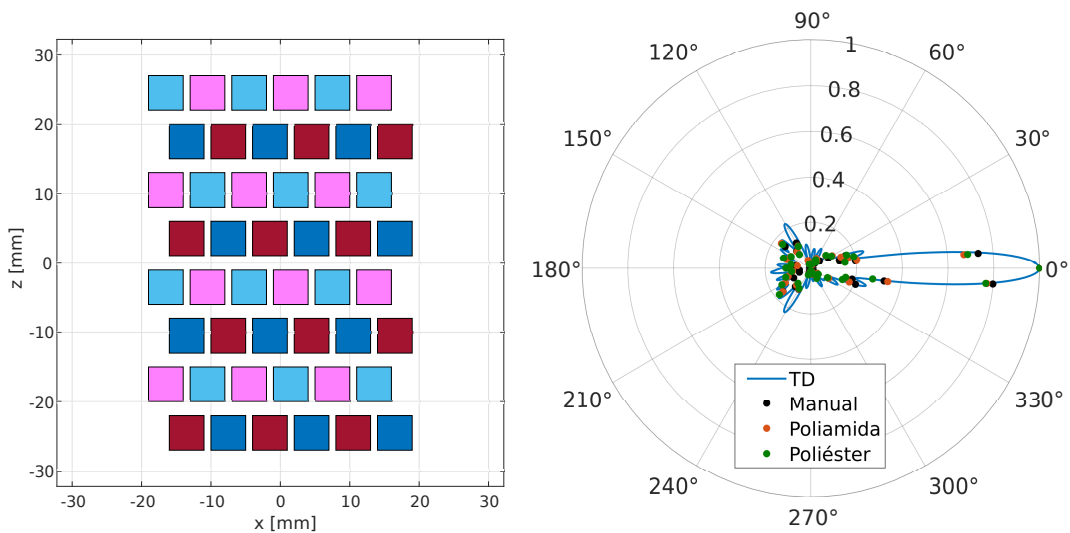


Figura 5.19: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 2$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

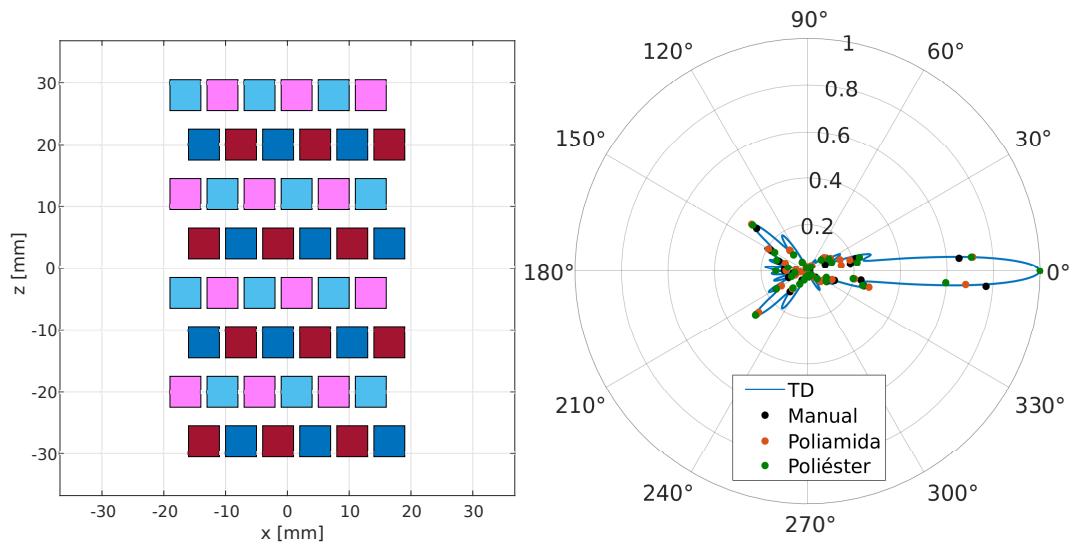


Figura 5.20: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 3$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

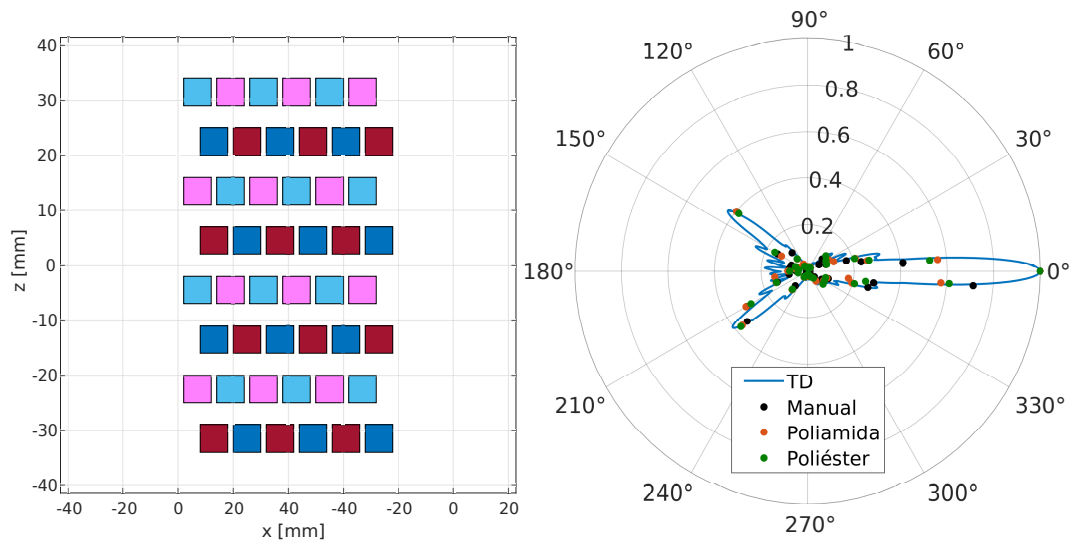


Figura 5.21: Esquemático e diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de configuração $w = L = 5$ mm, $g = 1$ mm, $\lambda = 12$ mm, $Q = 4$, $D = 4$ mm. Linhas azuis contínuas são os valores simulados com o modelo *TD*, símbolos pretos, laranjas e verdes são os pontos medidos experimentalmente a partir da bobina manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

5.3

Discussão dos Resultados

5.3.1

Comparação quantitativa com modelo teórico

A precisão de fabricação e montagem das diferentes tecnologias de bobinas para os *Side-Shifted PPM EMATs* foi quantificada a partir do cálculo da raiz quadrada do erro (ou diferença) médio, **RMSE**, do diagrama de radiação de cada experimento, frente ao diagrama teórico obtido pelo modelo, dado por:

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{\alpha_i}^T - V_{\alpha_i}^E)^2}{N}}, \quad (5-2)$$

onde $V_{\alpha_i}^T$ e $V_{\alpha_i}^E$ são os valores pico a pico das formas de onda obtidas teoricamente e experimentalmente, respectivamente, para os $N = 40$ pontos de medição α_i .

Os valores obtidos de **RMSE** são apresentados na Figura 5.22 em forma de mapa de cor e a Tabela 5.4 reporta o **RMSE** global de cada tecnologia. Dado por uma versão mais completa da equação (5-3):

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{e=1}^{N_{exp}} \sum_{i=1}^N (V_{\alpha_i}^T - V_{\alpha_i}^E)^2}{N_{exp} N}}, \quad (5-3)$$

onde N_{exp} é o número de experimentos realizados para cada tipo de bobina, ou seja, $N_{exp} = 12$ para as bobinas manuais e $N_{exp} = 16$ para as bobinas em PCB flexíveis.

O primeiro ponto a ser considerado é que, em todos os experimentos, o erro médio foi pequeno. O que indica que, tanto as bobinas manuais, quanto as feitas em PCB flexíveis, foram bem fabricadas e atingiram seus objetivos. Quando comparados os tipos de bobina, a que teve o menor erro médio foi a feita em poliéster, como reportado na Tabela 5.4. A diferença do **RMSE** obtido com as bobinas de poliéster, entretanto, é muito pequena em relação ao **RMSE** obtido com as bobinas de poliamida, por isso é difícil afirmar que o processo de fabricação e montagem das bobinas de poliéster resultaram em um dispositivo mais preciso, uma vez que a pequena variação do erro pode ser proveniente de pequenas imperfeições no processo de medição. Já as bobinas manuais apresentaram maior diferença, o que pode ser esperado dado a sua natureza de fabricação ser completamente manual, desde o processo de enrolamento da bobina, até o de "sanduichamento" das bobinas do tipo *multi-lap racetrack*.

Pode-se observar pela Figura 5.22 que, ao aumentar Q os valores de **RMSE** calculados costumam ser menores, isso ocorre porque, com menos fileiras de ímãs, qualquer desalinhamento entre as espiras e o arranjo de PPM

construído aumenta o desalinhamento relativo, o que é uma característica inerente ao dispositivo *Side-Shifted PPM EMAT*.

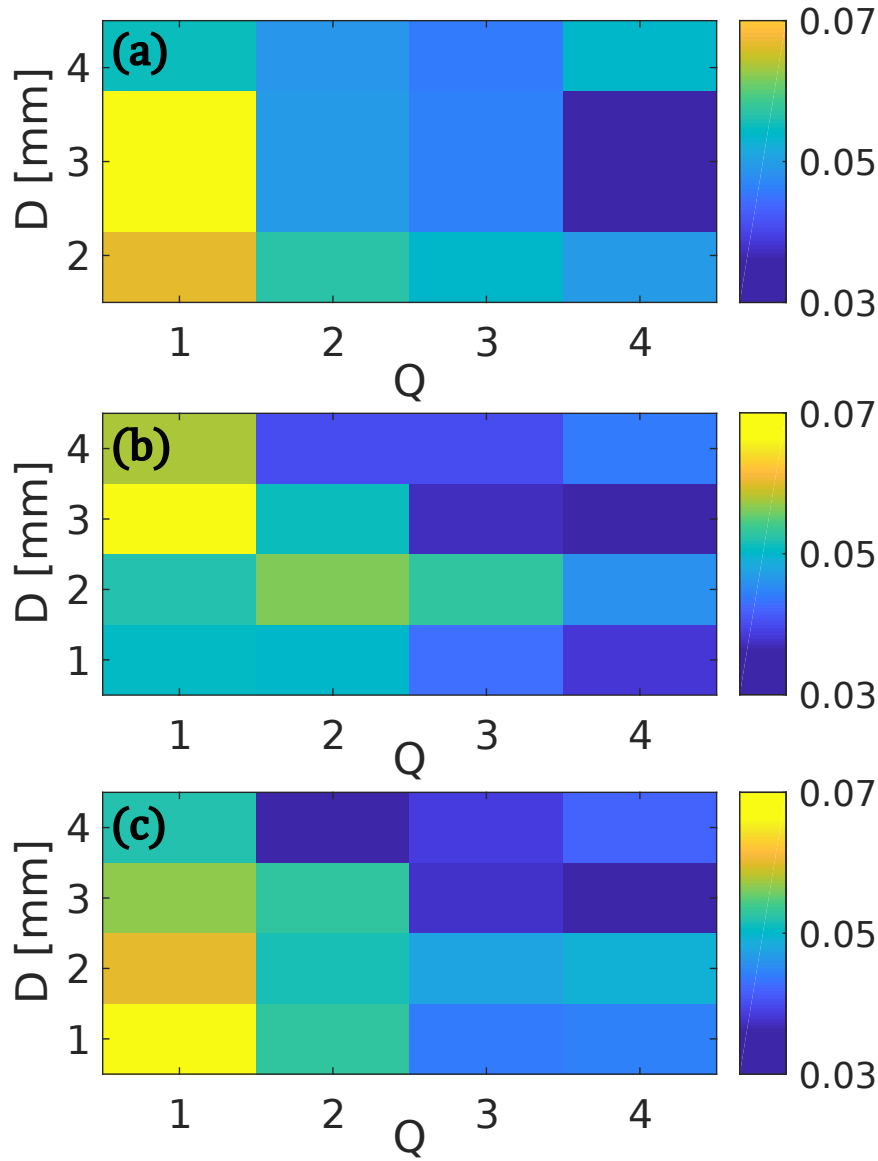


Figura 5.22: **RMSE** para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, Q , e da separação lateral entre fileiras, D . Cores mais claras representam valores maiores de **RMSE**, enquanto as cores mais escuras representam valores menores.

	Manual	Poliamida	Poliéster
RMSE	0.0537	0.0434	0.0409

Tabela 5.4: Raiz quadrada do erro médio, **RMSE** dos experimentos realizados para cada tecnologia de bobina do *Side-Shifted PPM EMAT*.

5.3.2

Análise de Unidirecionalidade

O objetivo principal desse trabalho é reduzir os lóbulos traseiros laterais do diagrama de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT*, de forma a aumentar a sua unidirecionalidade. Para quantificar o aumento de unidirecionalidade, os diagramas de radiação foram convertidos para suas representações em dB, através da equação (5-4):

$$V_{\alpha}^E(dB) = 20 \log_{10} \left(\bar{V}_{\alpha}^E \right) \quad , \quad (5-4)$$

onde $V_{\alpha}^E(dB)$ é o valor pico a pico experimental em decibéis para um ângulo α e \bar{V}_{α}^E é o valor pico a pico experimental obtido em um ângulo α , normalizado em relação a $\alpha = 0^\circ$.

Em seguida, os valores máximos dos lóbulos traseiros, isso é, quando $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ são apresentados na Figura 5.23, para as bobinas manual (a), de poliamida (b) e de poliéster (c).

Pode-se observar que, ao aumentar o número de fileiras de ímãs por PPM, o parâmetro Q , o valor máximo dos lóbulos traseiros laterais diminuem consideravelmente. Além disso, quando a separação lateral, parâmetro D , é menor, ocorre também a redução dos lóbulos traseiros laterais. Os valores experimentais são reportados nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, para as bobinas, manual, de poliamida e de poliéster, respectivamente.

	$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 3$	$Q = 4$
$D = 2 \text{ mm}$	-3.59 dB	-9.89 dB	-13.00 dB	-16.01 dB
$D = 3 \text{ mm}$	-3.37 dB	-8.35 dB	-10.39 dB	-10.86 dB
$D = 4 \text{ mm}$	-3.03 dB	-6.33 dB	-8.12 dB	-7.99 dB

Tabela 5.5: Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o *Side-Shifted PPM EMAT* de bobina feita manualmente.

	$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 3$	$Q = 4$
$D = 1 \text{ mm}$	-4.76 dB	-11.04 dB	-13.37 dB	-16.95 dB
$D = 2 \text{ mm}$	-4.57 dB	-10.24 dB	-11.39 dB	-15.5 dB
$D = 3 \text{ mm}$	-4.18 dB	-7.91 dB	-9.22 dB	-10.07 dB
$D = 4 \text{ mm}$	-3.44 dB	-6.71 dB	-7.61 dB	-8.00 dB

Tabela 5.6: Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o *Side-Shifted PPM EMAT* de bobina feita em PCB flexível de poliamida.

É importante ressaltar que, na Figura 5.23, existem diferenças entre os valores experimentais (símbolos) e simulados (curvas) de lóbulos traseiros máximos porque, ao realizar a medição, é possível que um ponto de máximo

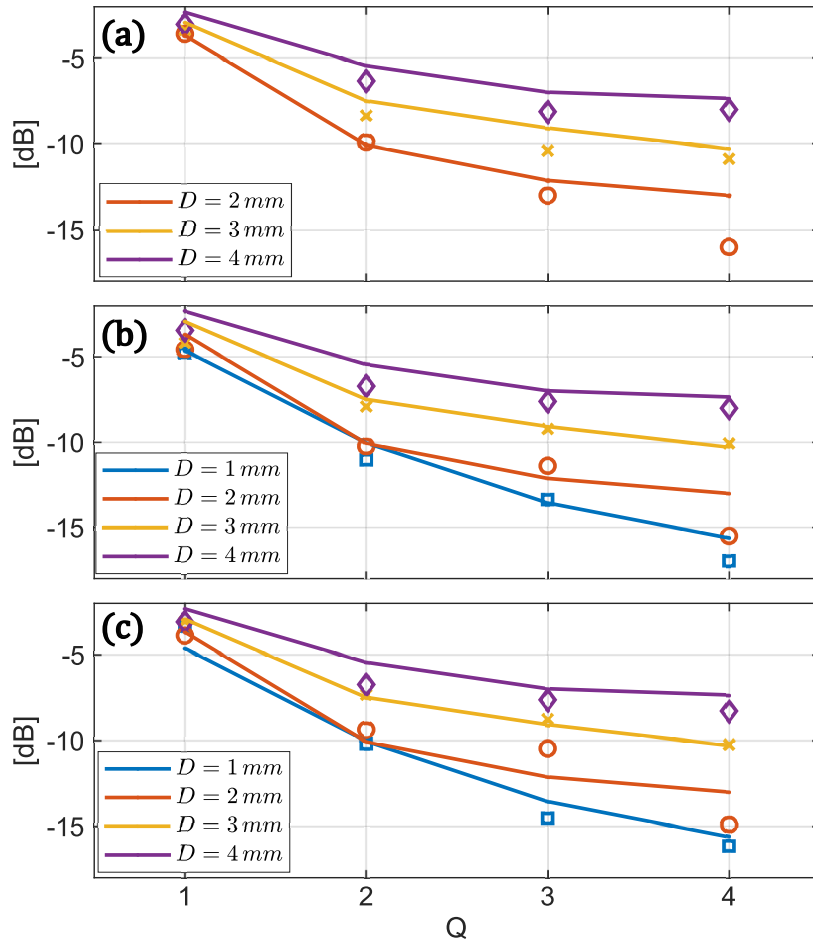


Figura 5.23: Valores máximos dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente (símbolos) e numericamente através do modelo TD (curvas) para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para diferentes separações laterais entre fileiras, D .

	$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 3$	$Q = 4$
$D = 1 \text{ mm}$	-3.32 dB	-10.19 dB	-14.54 dB	-16.15 dB
$D = 2 \text{ mm}$	-3.88 dB	-9.37 dB	-10.46 dB	-14.91 dB
$D = 3 \text{ mm}$	-3.05 dB	-7.33 dB	-8.75 dB	-10.24 dB
$D = 4 \text{ mm}$	-3.08 dB	-6.73 dB	-7.63 dB	-8.28 dB

Tabela 5.7: Valores máximos, em dB, dos lóbulos traseiros laterais obtidos experimentalmente para o *Side-Shifted PPM EMAT* de bobina feita em PCB flexível de poliéster.

tenha sido perdido devido a sua posição angular diferir dos pontos de medição escolhidos. Essas diferenças entre pontos foram todas mais aparentes em dispositivos com $Q = 4$ fileiras de ímãs por PPM e pequenas separações laterais, D , devido a menor largura angular dos lóbulos em questão, tais como se pode observar no diagrama de radiação das Figura 5.19, por exemplo.

Pode-se concluir que, para obter lóbulos traseiros laterais de magnitude

reduzida, portanto uma maior unidirecionalidade, é necessário aumentar o número de fileiras e reduzir a separação lateral entre essas fileiras. Isso pode ser explicado analisando o desalinhamento relativo entre as frentes de onda individuais, criadas por cada um dos arranjos PPMs. Esse desalinhamento é relativo as aberturas de cada PPM e à abertura total do *Side-Shifted PPM EMAT*. A abertura é aqui definida como a largura total do PPM estudado, ou seja, a abertura de cada PPM individual é dada pela relação:

$$A_p = (2Q - 1)w + (2Q - 2)D \quad , \quad (5-5)$$

onde $p = 1$ ou 2 . A abertura total do *Side-Shifted PPM EMAT* é:

$$A_t = 2Qw + (2Q - 1)D \quad . \quad (5-6)$$

Em dispositivos onde a abertura individual, A_p , é consideravelmente menor que a abertura total, A_t , tem-se que o campo irradiado no semi-plano negativo para posições angulares distante do eixo horizontal negativo $-x$, ou $\alpha = 180^\circ$, sofre significativamente maior influência do arranjo PPM mais próximo do que a contribuição do outro arranjo PPM, não ocorrendo a desejada interferência destrutiva. Um caso extremo e que representa bem essa ideia da abertura relativa entre os PPMs é quando $Q = 1$, nele $A_p = w$ e $A_t = 2w + D$, ou seja, a abertura total do *Side-Shifted PPM EMAT* é maior do que o dobro da abertura individual de cada PPM, isso faz com que os lóbulos traseiros laterais sejam de alta intensidade, como demonstrado visualmente na seção anterior e reportado nas tabelas acima. Por outro lado, quando aumenta-se Q , a diferença relativa entre A_p e A_t se torna cada vez menor, por isso, mesmo que a medição seja feita angularmente distante de $\alpha = 180^\circ$, a onda gerada pelo PPM mais próximo é aproximadamente igual ao PPM mais distante, ocorrendo adequada interferência destrutiva, gerando assim lóbulos de baixa amplitude.

5.3.3

Intensidade das ondas geradas na direção frontal

Uma característica importante para qualquer dispositivo transdutor é a sua capacidade de transmitir energia no meio de interesse. Dispositivos PPM EMATs são conhecidos por apresentar baixa eficiência nesse quesito [16,19]. Por isso, é importante avaliar a intensidade das ondas que se propagam na direção frontal geradas por cada uma das configurações abordadas nessa dissertação.

Essa característica é analisada na Figura 5.24, onde foram medidos os valores pico a pico de cada forma de onda recebida em $\alpha = 0^\circ$. Depois disso, os valores foram normalizados pelo máximo global de todos os experimentos, diferente da análise anterior para os valores máximos dos lóbulos traseiros laterais, onde a normalização foi feita para cada dispositivo medido. Pode-se ver

que existe um comportamento quase monotônico de acréscimo de energia transmitida com o aumento do parâmetro Q . Isso ocorre porque, com o aumento no número de fileiras de ímãs por PPM, a quantidade efetiva de fontes também cresce. Ou seja, em $\alpha = 0^\circ$ tem-se mais frentes de onda se combinando construtivamente, gerando uma maior onda propagante. Entretanto, ao aumentar Q , a largura total do dispositivo também aumenta, isso pode ser indesejado em aplicações que exijam transdutores menores. A amplitude das ondas também é dependente da separação lateral entre espiras, entretanto, em menor grau do que a dependência com o número de fileiras de ímãs. Isso ocorre porque, ao diminuir a separação lateral, ou seja, aproximar as fileiras de ímãs, as frentes de onda no ponto de medição em $\alpha = 0^\circ$ tem menor diferença de fase, devido ao, ligeiramente, menor percurso de propagação ao ponto de interesse, ocasionando em uma interferência construtiva mais eficiente.

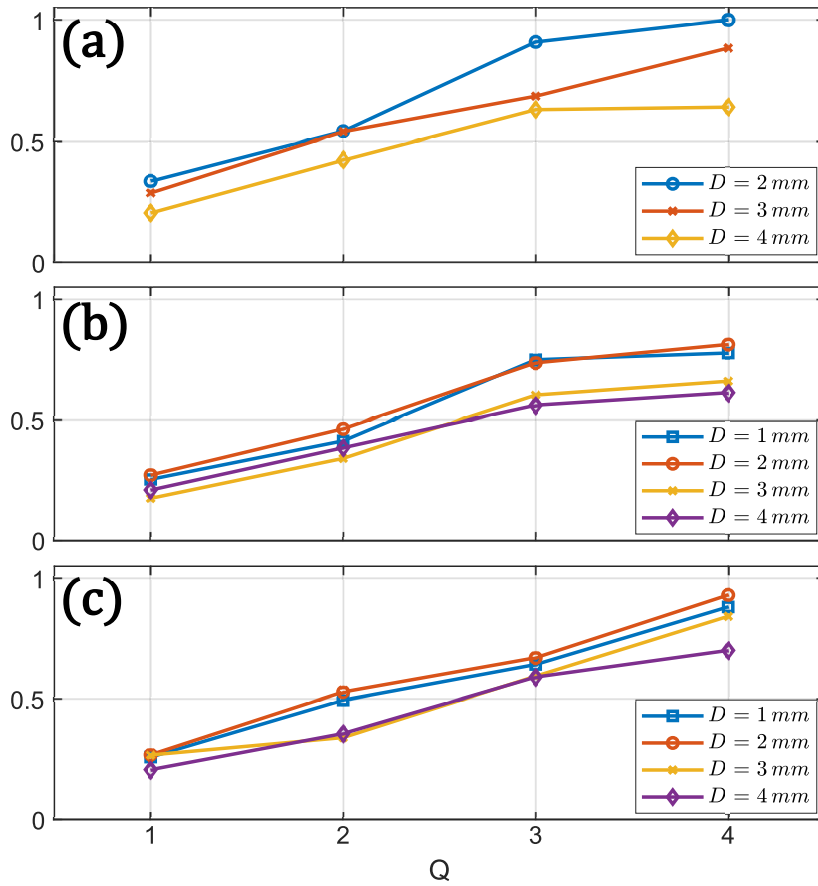


Figura 5.24: Amplitude normalizada em $\alpha = 0^\circ$, para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (a), de poliamida (b) e poliéster (c), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para diferentes separações laterais entre fileiras, D .

Outro fator que deve ser levado em consideração ao examinar a Figura 5.24 é que as bobinas manuais contêm mais espiras que as bobinas em PCB. Ou

seja, sua densidade de espiras (fontes lineares de campo) pela largura do ímã, w , é maior. Devido às limitações de construção, citadas em 4.1.1.2, derivadas dos equipamentos utilizados pelo fornecedor comercial das bobinas em PCB, essas possuem 10 espiras posicionadas sob o ímã, enquanto as bobinas manuais foram feitas com aproximadamente 20 espiras, já que as espiras puderam ser posicionadas com distância efetivamente nula entre si. Deve-se observar que, em ambos os casos, nem todas as espiras estão garantidamente posicionadas sob os ímãs. Mas, mesmo assim, para as bobinas manuais espera-se que haja mais espiras efetivamente funcionando como fonte linear de campo. Portanto, é esperado que as bobinas manuais gerem ondas de maior amplitude, essa análise é mais evidente através da Figura 5.25, que apresenta os mesmos valores de amplitude normalizados medidos em $\alpha = 0^\circ$ da Figura 5.24, porém os gráficos são divididos para cada separação lateral D , combinando os três diferentes tipos de bobina.

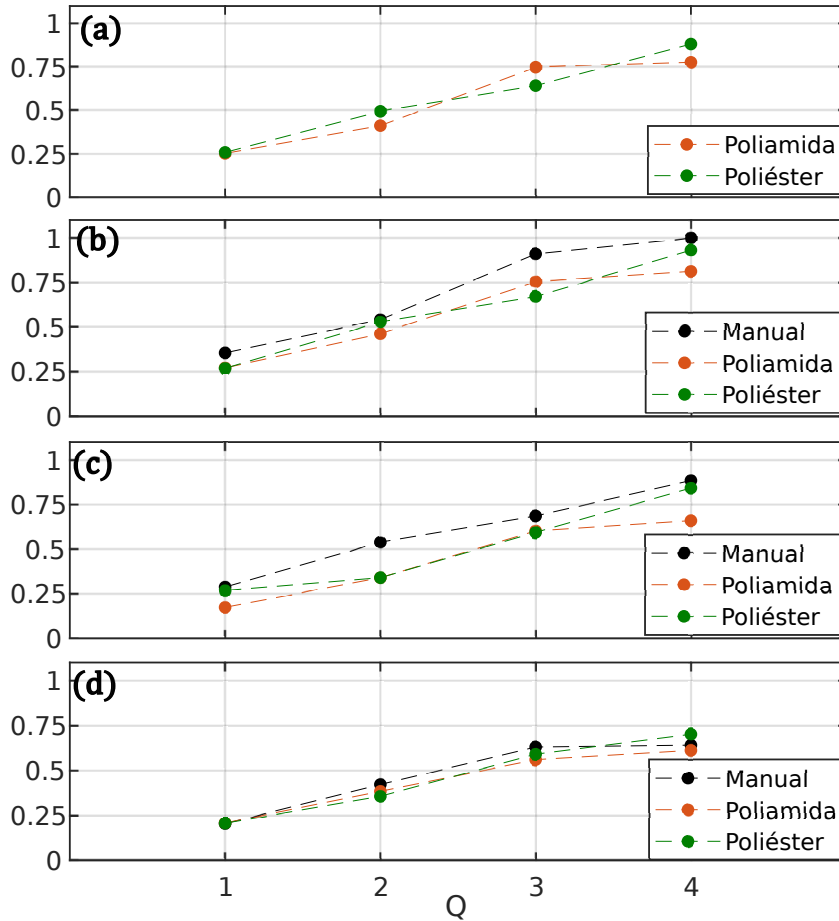


Figura 5.25: Valores experimentais da amplitude normalizada em $\alpha = 0^\circ$, para os *Side-Shifted PPM EMATs* com bobinas manual (linhas e símbolos pretos), de poliamida (linhas e símbolos laranjas) e poliéster (linhas e símbolos verde), em função do número de fileiras de ímãs por PPM, para separações laterais entre fileiras, $D = 1$ mm (a), $D = 2$ mm (b), $D = 3$ mm (c) e $D = 4$ mm (d).

Assim, pode-se ver que a bobina manual apresenta maior amplitude da onda gerada em todos os experimentos, com a exceção do dispositivo feito em poliéster com $D = 4$ mm e $Q = 4$ fileiras de ímãs. Em relação às bobinas feitas em PCB, os valores de amplitude medidos entre as bobinas de poliamida e poliéster são próximos, porém, a bobina feita em poliéster apresenta ondas de amplitudes levemente maiores. Tal característica se deve, provavelmente, à construção dessas bobinas, que garantiu a mesma distância entre as espiras e a placa metálica, ao contrário da bobina feita em poliamida.

5.3.4

Análise Final dos Resultados

Levando em conta todos os resultados e análises quantitativos apresentados neste capítulo, a bobina que apresentou melhor combinação de resultados e facilidade de fabricação foi a feita a partir de PCB flexível de poliamida. Os valores **RMSE** da mesma foram aproximadamente iguais aos da bobina de poliéster, ambas sendo melhores que as bobinas manuais. Quanto à intensidade na geração de ondas frontais, essa apresentou resultados inferiores à manual, mas aproximadamente iguais à de poliéster. Contudo, a bobina em poliamida é de fácil fabricação por ser feita em PCB, o que lhe garante uma precisão experimental maior, sua folha tem pequena espessura ($75\mu\text{m}$), o que proporcionou uma fácil montagem, comparada à bobina de poliéster, somente sendo necessário colar uma folha sobre a outra e também apresentou bons níveis de transdução, o que é importante ao desenvolver um dispositivo para ser usado na indústria.

Nesta dissertação, foram investigados dispositivos PPM EMATs duplos, em especial os *Side-Shifted PPM EMATs* para geração unidirecional de ondas SH em uma placa de alumínio. Essa característica de geração de ondas difere dos PPM EMATs convencionais, que geram ondas em duas direções, o que é geralmente uma desvantagem em aplicações práticas. Com o objetivo de se aprimorar a unidirecionalidade dos *Side-Shifted PPM EMATs*, foram analisadas as influências do número de fileiras de ímãs por PPM e o espaçamento entre as mesmas no diagrama de radiação dos dispositivos construídos.

Um modelo analítico para a simulação do diagrama de radiação de diferentes configurações de PPM EMATs foi criado. As configurações simuladas, de forma a validar o modelo, foram o PPM EMAT convencional, o Dual-Linear Coil PPM EMAT e o *Side-Shifted PPM EMAT*, objeto principal desse trabalho. O modelo desenvolvido se mostrou eficiente e de acordo com os resultados experimentais. O mesmo foi implementado em duas versões, a saber, *Continuous Wave* e *Time Domain*. A última permite não somente simular os diagramas de radiação de diferentes construções do *Side-Shifted PPM EMAT*, mas também suas formas de ondas de geradas. O algoritmo desenvolvido se mostrou uma excelente alternativa às custosas simulações numéricas por elementos finitos.

A partir dos resultados numéricos, a influência da variação da separação lateral entre fileiras de ímãs e o número de fileiras de ímãs por PPM no diagrama de radiação de um *Side-Shifted PPM EMAT* foi estudada e validada experimentalmente.

Descobriu-se que ao reduzir a separação lateral entre fileiras de ímãs ou aumentar o número de fileiras obteve-se redução dos lóbulos traseiros laterais nos diagramas de radiação do *Side-Shifted PPM EMAT* de até 8,6 dB. Permitindo portanto melhor unidirecionalidade, objetivo principal deste trabalho. De forma adicional, isso também aumentou a amplitude da onda frontal gerada, aumentando a eficiência de transdução do dispositivo. Em contrapartida, aumentar o número de fileiras de ímãs por PPM resulta em dispositivos mais largos e na necessidade de se trabalhar com bobinas não convencionais, a saber do tipo *multi-lap racetrack coil*, o que pode aumentar a complexidade de implementação do dispositivo.

Para se fabricar os dispositivos *Side-Shifted PPM EMAT*, foram desenvolvidas três diferentes bobinas do tipo *multi-lap racetrack*, sendo elas, as bobinas manuais e as bobinas em placas de circuito impresso flexíveis feitas em poliamida e poliéster. De forma geral, as bobinas feitas em PCB apresentaram resultados mais próximos dos simulados, devido à sua natureza de fabricação mais precisa e automatizada. As bobinas feitas em PCB apresentaram menores níveis de energia que as bobinas manuais, devido ao menor número de espiras utilizadas. Entretanto, essa diferença não é grande o suficiente para considerar as bobinas manuais como as melhores alternativas para se construir o *Side-shifted PPM EMAT*, sendo as bobinas em PCB a melhor escolha. A bobina feita a partir de PCB em poliamida merece maior destaque pois apresentou pequena diferença experimental para a numérica e maior facilidade de fabricação, o que proporciona um dispositivo não só confiável mas também de simples reprodutibilidade.

6.1

Trabalhos Futuros

Com o objetivo de se aprimorar a pesquisa desenvolvida neste trabalho, os seguintes assuntos podem ser estudados:

- Simulação e fabricação de *Side-Shifted PPM EMATs* com diferentes parâmetros de construção. Variando principalmente as dimensões dos ímãs.
- Pesquisa em placas de circuito impresso flexíveis com impressão dupla-face. Com isso, o processo de montagem das bobinas seria quase completamente automatizado.
- Aprimoramento do modelo desenvolvido, de forma a simular também o acoplamento eletromagnético seguindo modelo similar a outros trabalhos da área [23, 42, 58]. Com isso, o modelo pode passar a simular os efeitos de *lift-off* no PPM EMAT, através de fatores como a intensidade dos ímãs utilizados e a corrente induzida.
- Fabricar um molde que englobe tanto os arranjos PPM quanto a bobina. Com isso, construir-se-á um dispositivo monolítico similar a um PPM EMAT comercial.
- Construção de um molde curvado para os Dual-PPMs, com o objetivo de realizar experimentos com o *Side-Shifted PPM EMATs* em dutos metálicos.

Referências bibliográficas

- [1] Z. Su, L. Ye, and Y. Lu, “Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, no. 3, pp. 753–780, 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X0600109X>
- [2] M. J. S. Lowe and O. Diligent, “Low-frequency reflection characteristics of the S0 lamb wave from a rectangular notch in a plate,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 1, pp. 64–74, 2002. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.1424866>
- [3] M. Lowe, D. Alleyne, and P. Cawley, “Defect detection in pipes using guided waves,” *Ultrasonics*, vol. 36, no. 1, pp. 147–154, 1998, ultrasonics International 1997. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X97000383>
- [4] J. L. Rose, D. Jiao, and J. Spanner, *Ultrasonics Guided Waves for Piping Inspection*. Boston, MA: Springer US, 1997, pp. 1285–1290. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5947-4_167
- [5] R. Praetzel, T. Clarke, D. Schmidt, H. de Oliveira, and W. C. Dias da Silva, “Monitoring the evolution of localized corrosion damage under composite repairs in pipes with guided waves,” *NDT E International*, vol. 122, p. 102477, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869521000761>
- [6] M. Clough, M. Fleming, and S. Dixon, “Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound,” *NDT & E Int.*, vol. 86, pp. 20 – 27, 2017.
- [7] H. Miao and F. Li, “Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review,” *Ultrasonics*, vol. 114, p. 106355, 2021.
- [8] R. C. Jacques, H. T. H. de Oliveira, R. W. F. dos Santos, and T. G. R. Clarke, “Design of an emat guided wave collar for coated riser inspection,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 24, pp. 14 662–14 669, 2020.

- [9] J. L. Rose, *Ultrasonic Guided waves in solid media*. Cambridge University Press, 2014.
- [10] D. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press, 2002.
- [11] A. Raghavan and C. Cesnik, “Review of guided-wave structural health monitoring,” *The Shock and Vibration Digest*, vol. 39, pp. 91–114, 03 2007.
- [12] Z. Liu, B. Wu, C. He, S. Yang, and X. Wang, “Detection of longitudinal defect in pipes using torsional modes,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 19, pp. 146–150, 03 2006.
- [13] J. Jingpin, Z. Xi, H. Cunfu, and W. Bin, “Experiments on non-destructive testing of grounding grids using SH0 guided wave,” *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol. 54, no. 7, pp. 375–379, 2012.
- [14] H. Miao, Q. Huan, F. Li, and G. Kang, “A variable-frequency bidirectional shear horizontal (SH) wave transducer based on dual face-shear (d24) piezoelectric wafers,” *Ultrasonics*, vol. 89, pp. 13–21, 2018.
- [15] M. Chen, Q. Huan, and F. Li, “A unidirectional SH wave transducer based on phase-controlled antiparallel thickness-shear (d15) piezoelectric strips,” *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 299–306, 2020.
- [16] M. Hirao and O. H, *EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements*. Springer, 2017.
- [17] K.-T. Wu, C.-K. Jen, R. Murayama, and J. Oliveira, “Generation and detection of guided acoustic waves for ndt high temperature wedges,” *Proc Cansmart Inter Workshop*, p. 103 – 113, 2009.
- [18] Y. Y. Kim and Y. E. Kwon, “Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides,” *Ultrasonics*, vol. 62, pp. 3–19, 2015.
- [19] L. Xiang, S. Dixon, C. Thring, Z. Li, and R. Edwards, “Lift-off performance of electromagnetic acoustic transducers (EMATs) for surface acoustic wave generation,” *NDT E International*, vol. 126, p. 102576, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869521001754>

- [20] O. Trushkevych, M. Tabatabaeipour, S. Dixon, M. D. G. Potter, G. Dobie, C. Macleod, and R. S. Edwards, “Miniaturised SH EMATs for fast robotic screening of wall thinning in steel plates,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 1386–1394, 2021.
- [21] A. C. Kubrusly, P. Tovar, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Numerical investigation of mode conversion of SH guided waves in plates reflected from discontinuities with different symmetries,” in *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2019, pp. 2202–2205.
- [22] Y. Zhang, W. Liu, N. Li, Z. Qian, B. Wang, D. Liu, and X. Li, “Design of a new type of omnidirectional shear-horizontal emat by the use of half-ring magnets and pcb technology,” *Ultrasonics*, vol. 115, p. 106465, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X21000998>
- [23] P. Wilcox, M. Lowe, and P. Cawley, “The excitation and detection of Lamb waves with planar coil electromagnetic acoustic transducers,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, no. 12, pp. 2370–2383, 2005.
- [24] H. M. Seung, C. I. Park, and Y. Y. Kim, “An omnidirectional shear-horizontal guided wave emat for a metallic plate,” *Ultrasonics*, vol. 69, pp. 58–66, 2016.
- [25] Z. Liu, Y. Zhang, M. Xie, A. Li, W. Bin, and C. He, “A direction-tunable shear horizontal mode array magnetostrictive patch transducer,” *NDT & E International*, vol. 97, pp. 20–31, 2018.
- [26] K. Toda and Y. Shinoda, “A unidirectional transducer with three electrode groups for Lamb-wave devices,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 63, no. 2, pp. 614–617, 1978. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.381761>
- [27] T. Yamasaki, S. Tamai, and M. Hirao, “Arrayed-coil EMAT for longitudinal wave in steel wires,” in *1998 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*, vol. 1, 1998, pp. 789–792 vol.1.
- [28] X. Chen, R. Su, H. Zhang, S. Wang, and G. Zhai, “Influence of coil parameters on transduction performance of unidirectional EMATs for Rayleigh wave,” in *2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application*, 2013, pp. 150–154.

- [29] Y.-Q. Li, C. Li, R.-L. Su, G.-F. Zhai, and K.-C. Wang, “Unidirectional line-focusing shear vertical wave emats used for rail base center flaw detection,” in *2016 IEEE Far East NDT New Technology I& Application Forum (FENDT)*, 2016, pp. 99–102.
- [30] S. L. Huang, H. Y. Sun, Q. Wang, S. Wang, and W. Zhao, “Unidirectional focusing of horizontally polarized shear elastic waves electromagnetic acoustic transducers for plate inspection,” *Journal of Applied Physics*, vol. 125, no. 16, p. 164504, 2019.
- [31] A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, “Unidirectional shear horizontal wave generation with side-shifted periodic permanent magnets electromagnetic acoustic transducer,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 67, no. 12, pp. 2757–2760, 2020.
- [32] A. C. Kubrusly, L. Kang, I. Martins, and S. Dixon, “Unidirectional shear horizontal wave generation by periodic permanent magnets electromagnetic acoustic transducer with dual linear-coil array,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 68, no. 10, pp. 3135–3142, 2021.
- [33] K. F. Graff, *Wave motion in elastic solids*. Courier Corporation, 2012.
- [34] B. A. Auld and R. E. Green, “Acoustic fields and waves in solids: Two volumes,” *Physics Today*, vol. 27, no. 10, pp. 63–64, 1974. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.3128926>
- [35] A. C. Kubrusly, M. A. Freitas, J. P. von der Weid, and S. Dixon, “Mode selectivity of SH guided waves by dual excitation and reception applied to mode conversion analysis,” *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 7, pp. 1239–1249, July 2018.
- [36] A. C. Kubrusly, N. Pérez, T. F. de Oliveira, J. C. Adamowski, A. M. B. Braga, and J. P. von der Weid, “Mechanical strain sensing by broadband time reversal in plates,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 63, no. 5, pp. 746–756, 2016.
- [37] L. M. Martinho, A. C. Kubrusly, N. Pérez, and J. P. von der Weid, “Strain sensitivity enhancement of broadband ultrasonic signals in plates using spectral phase filtering,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 6, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/6/2582>
- [38] L. M. Martinho, A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, “Computation of the radiation pattern of unidirectional sh wave generated by dual-PPM

- EMATs,” in *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2021, pp. 1–4.
- [39] R. Murayama, “Driving mechanism on magnetostrictive type electromagnetic acoustic transducer for symmetrical vertical-mode Lamb wave and for shear horizontal-mode plate wave,” *Ultrasonics*, vol. 34, no. 7, pp. 729–736, 1996.
- [40] S. Dixon, C. Edwards, and S. Palmer, “High accuracy non-contact ultrasonic thickness gauging of aluminium sheet using electromagnetic acoustic transducers,” *Ultrasonics*, vol. 39, no. 6, pp. 445–453, 2001. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X0100083X>
- [41] E. C. E. C. Jordan and K. G. K. G. Balmain, *Electromagnetic waves and radiating systems*, 2nd ed., ser. Prentice-Hall electrical engineering series. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1968.
- [42] R. Thompson, “A model for the electromagnetic generation and detection of Rayleigh and Lamb waves,” *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 20, no. 4, pp. 340–346, 1973.
- [43] S. Wentworth, *Fundamentals of Electromagnetics with Engineering Applications*. John Wiley, 2006.
- [44] S. Dixon, P. A. Petcher, Y. Fan, D. Maisey, and P. Nickolds, “Ultrasonic metal sheet thickness measurement without prior wave speed calibration,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, no. 44, p. 445502, oct 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/44/445502>
- [45] W. Zhu and J. Rose, “Lamb wave generation and reception with time-delay periodic linear arrays: a bem simulation and experimental study,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 46, no. 3, pp. 654–664, 1999.
- [46] Q. Ma, J. Jingpin, P. Hu, X. Zhong, B. Wu, and C. He, “Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 27, 02 2014.
- [47] J. Lee, Y. Y. Kim, and S. Cho, “Beam-focused shear-horizontal wave generation in a plate by a circular magnetostrictive patch transducer employing a planar solenoid array,” *Smart Materials and Structures*, vol. 18, p. 015009, 12 2008.

- [48] R. Baiotto, “Desenvolvimento e caracterização de transdutor acústico eletromagnético de Ímãs permanentes periódicos,” Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- [49] J. D. Achenbach and Y. Xu, “Wave motion in an isotropic elastic layer generated by a time-harmonic point load of arbitrary direction,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 106, no. 1, pp. 83–90, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.427037>
- [50] L. Xiang, D. Greenshields, S. Dixon, and R. S. Edwards, “Phased electromagnetic acoustic transducer array for rayleigh wave surface defect detection,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 67, no. 7, pp. 1403–1411, 2020.
- [51] O. V. Muraveva, V. V. Muravev, and Y. V. Myshkin, “Laws of formation of grating lobes in the acoustic field of electromagnetic–acoustic transducers as a linear array of unidirectional conductors,” *NDT & E Int.*, vol. 93, pp. 40–56, 2018.
- [52] S. Huang, W. Zhao, Y. Zhang, and S. Wang, “Study on the lift-off effect of emat,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 153, no. 2, pp. 218–221, 2009. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424709002647>
- [53] M. Abramowitz and I. Stegun, *Handbook Of Mathematical Functions: With Formulas, Graphs, And Mathematical Tables*. U.S. Department of Commerce, 1970.
- [54] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Signals Systems (2nd Ed.)*. USA: Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [55] M. Frigo and S. Johnson, “Fftw: an adaptive software architecture for the fft,” in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP ’98 (Cat. No.98CH36181)*, vol. 3, 1998, pp. 1381–1384 vol.3.
- [56] L. M. Martinho, A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, “Enhancement of the unidirectional radiation pattern of shear horizontal ultrasonic waves generated by side-shifted periodic permanent magnets electromagnetic acoustic transducers with multiple rows of magnets,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 7637–7644, 2022.
- [57] A. C. Kubrusly, L. Kang, and S. Dixon, “One-dimension frequency–wavenumber-domain based model for ultrasonic waves

- generated by dual-array transducers,” *Ultrasonics*, vol. 124, p. 106772, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X22000804>
- [58] R. Thompson, “A model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals,” *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 25, no. 1, pp. 7–15, 1978.