



Estudo e Caracterização Experimental da Magnetostrição da Chapa Magnética de Transformadores de Potência

JOÃO PEDRO TAVARES MOTA

dezembro de 2017

ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA MAGNETOSTRIÇÃO DA CHAPA MAGNÉTICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

João Pedro Tavares Mota

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA MAGNETOSTRIÇÃO DA CHAPA MAGNÉTICA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

João Pedro Tavares Mota
1111543

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de César Miguel Almeida Vasques e Francisco José Gomes da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor César Miguel Almeida Vasques
Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Joaquim Gabriel Magalhães Mendes
Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade Porto

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar a minha sincera gratidão ao Professor Doutor César Miguel Almeida Vasques por ter proposto o trabalho, pela sua disponibilidade, pela incessante ajuda prestada, pela orientação das metodologias adotadas e pelo conhecimento e informação partilhados, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva pelo apoio na realização da análise metalográfica.

À EFACEC pela disponibilização do equipamento necessário à realização dos ensaios.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelos recursos disponibilizados para a preparação e análise das amostras metalográficas e à Técnica Superior, Mestre Maria de Fátima Gonçalves da Costa Andrade, pela ajuda na preparação das amostras e na aquisição das imagens.

PALAVRAS CHAVE

Aço elétrico, chapa magnética, LabVIEW, magnetostricção, ponte de Epstein, ruído, transformador de potência, vibrações.

RESUMO

A necessidade de instalar transformadores de potência nas proximidades de populações leva a que haja necessidade de garantir que o nível de ruído emitido pelos mesmos seja o menor possível. A geração de ruído em transformadores e máquinas elétricas é um tema muito complexo e, por isso, as diversas fontes de ruído em transformadores têm sido alvo de inúmeros estudos, sendo a magnetostricção do núcleo tipicamente a principal.

Neste trabalho foi feito um levantamento de informação relativo ao magnetismo e materiais magnéticos, bem como relativamente a aspetos construtivos e processos de fabrico de transformadores. Foram reunidos resultados de estudos de vários autores sobre a influência dos processos de corte da chapa magnética e do seu impacto na magnetostricção. Também foram analisados dispositivos para análise do comportamento magnético da chapa e os tipos de instrumentação existentes que podem ser utilizados para medição de magnetostricção.

Como não havia informação relativamente à estrutura metalográfica específica dos tipos de chapa frequentemente utilizados pela EFACEC, foi feita uma análise metalográfica para averiguar o tamanho e a orientação do grão e se era detetável deformação e alteração significativa do grão na zona do corte. Foram identificados o tamanho e a forma do grão, mas não se detetaram deformações e alterações significativas provocadas pelo corte.

A caracterização experimental da magnetostricção é muito controversa. Não há normas que definam claramente os processos de medição, instrumentos de medição e procedimentos. Neste trabalho foi utilizado um sistema composto por uma ponte de Epstein e um extensómetro colado numa chapa de teste. Com este sistema foi possível medir a magnetostricção ainda que com muito ruído elétrico, que teve de ser eliminado por um conjunto de filtros digitais. Foram testadas diversas quantidades de chapas e registados valores para várias gamas de indução, concluindo-se que os ensaios com menos chapas permitiam obter resultados mais representativos.

KEYWORDS

Electrical steel sheet, Epstein frame, LabVIEW, magnetostriction, power transformers, noise, vibrations.

ABSTRACT

The need to install power transformers near populations has led to an increasing interest in the reduction of their noise level. The generation of noise in transformers and electric machines is a very complex subject and that is why a diversity of noise sources in transformers have been the object of numerous studies, where the magnetostriction of the core is typically the main one.

In this work, information was collected regarding magnetism and magnetic materials, as well as regarding construction and manufacturing aspects of transformers. Results of studies by several authors on the influence of the cutting processes of the electric steel sheet and its impact on the magnetostriction were analysed. Devices for the analysis of the magnetic behaviour of electric steel sheets and the types of instrumentation that can be used for magnetostriction measurement were also studied.

As there was no information regarding the metallographic structure of the specific types of steel sheets used by EFACEC, a metallographic analysis was carried out to ascertain the size and orientation of the grain and detect deformation and grain modification in the cutting zone. The size and shape of the grain were identified but no significant deformation caused by the cutting process was detected.

The experimental characterization of magnetostriction is very controversial. There are no standards clearly defining measuring instruments and procedures. In this work, a system composed of an Epstein bridge and a strain gauge was used in one of the steel sheet test plates. With this system, it was possible to identify magnetostriction even from noisy measurements, where noise had to be eliminated by a set of digital filters. Several amounts of steel sheets were tested, and values were recorded for various induction ranges, being concluded that the tests with less plates allow to obtain more representative results.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AT	alta tensão
BT	baixa tensão
fem	força eletromotriz
fmm	força magnetomotriz

Lista de Unidades

A	ampere
°C	grau celsius
dB	decibel
Hz	hertz
kg	quilograma
m	metro
mm	milímetro
nm	nanómetro
μm	micrómetro
Pa	pascal
MPa	mega pascal
MVA	mega voltampere
T	tesla
W	watt
Ω	ohm

Lista de Símbolos

a	relação entre o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário do transformador
A	área da secção transversal
A_l	alongamento
B	indução magnética
B_M	indução magnética de pico
b_r	densidade de fluxo na direção da laminagem
b_t	densidade de fluxo na direção transversal à laminagem
\mathbf{c}^H	matriz de rigidez
\mathbf{e}	matriz piezomagnética
E	campo elétrico
f	frequência da tensão
f_0	frequência da polarização magnética

G_{rt}	módulo magnético de corte
H	intensidade de campo magnético
H_c	intensidade de campo magnético coercivo
i	corrente elétrica
I	corrente elétrica alternada sinusoidal
J	polarização de saturação
L	indutância
L_{aA}	nível de aceleração de ponderação A da magnetostricção
L_{vA}	nível de velocidade de ponderação A da magnetostricção
M	indutância mútua
N	número de espiras do enrolamento
N_1	número de espiras do enrolamento primário
N_2	número de espiras do enrolamento secundário
p_e	resistividade elétrica
P_{e0}	pressão mínima sonora audível
P_r	módulo magnético na direção da laminagem
P_t	módulo magnético na direção transversal à da laminagem
r	raio
R_m	tensão de rotura à tração
R_p	tensão de cedência à tração
S	deformação
T	temperatura
T_c	temperatura de Curie
T_N	temperatura de Néel
v	tensão elétrica
V	tensão elétrica alternada sinusoidal
X	reactância
α	coeficiente de ponderação A
β	ângulo genérico
γ_{rt}	deformação de corte entre a direção da laminagem e a direção transversal à da laminagem
λ	magnetostricção
λ_r	magnetostricção na direção da laminagem
λ_t	magnetostricção na direção transversal à laminagem
μ	permeabilidade magnética
μ_0	permeabilidade magnética no vazio
ξ_r	coeficiente de Poison magnético na direção da laminagem
ξ_t	coeficiente de Poison magnético na direção transversal à da laminagem
ρ	massa volúmica
ρ_{atm}	massa volúmica da atmosfera
σ	tensão mecânica
τ	Constante de tempo
ϕ	fluxo magnético
χ	suscetibilidade magnética

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Esquema de transformador monofásico (Dasgupta, 2009).	8
2.2	Transformador ideal (Sen, 2013).	8
2.3	Desenvolvimento do circuito equivalente do transformador real (Sen, 2013).	11
2.4	Transformador do tipo <i>shell</i> (a) e do tipo <i>core</i> (b) (McLyman, 2004).	13
2.5	Desenvolvimento de um transformador trifásico do tipo <i>core</i> (Sen, 2013).	14
2.6	Transformadores trifásicos do tipo <i>core</i> (a) e do tipo <i>shell</i> (b) (ABB, 2004).	15
2.7	Preenchimento da área limitada pelo enrolamento com vários tamanhos de chapa (ABB, 2004).	16
2.8	Ângulos de corte do núcleo (Dasgupta, 2009).	17
2.9	Empilhamento do tipo <i>single step-Lap</i> (SSL) (a) e do tipo <i>multiple step-lap</i> (MSL) (b) (Maira, 2003).	18
2.10	Núcleo de transformador trifásico com bandas de aço a ligar as chapas (Healthcote, 1996).	18
3.1	Comportamento magnético das substâncias diamagnéticas (Moskowitz, 1991).	21
3.2	Comportamento magnético das substâncias paramagnéticas (Moskowitz, 1991).	22
3.3	Esquema do alinhamento dos momentos magnéticos (a) e comportamento magnético em função da temperatura (b) das substâncias ferromagnéticas (Moskowitz, 1991).	22
3.4	Esquema de alinhamento da estrutura atômica (a) e dos momentos magnéticos (b) dos materiais ferrimagnéticos (Moskowitz, 1991).	23
3.5	Esquema de alinhamento da estrutura atômica (a) e comportamento magnético em função da temperatura (b) das substâncias antiferromagnéticas (Moskowitz, 1991).	24
3.6	Ciclo de histerese típico e os seus pontos característicos (Tumanski, 2011).	24
3.7	Corpo magnético com quatro domínios adjacentes (1,2,3 e 4) (Heck, 1974).	25
3.8	Campo magnético de corpos com vários domínios (Zureks, 2008).	25
3.9	Deslocamento lateral das paredes dos domínios devido a um campo magnético externo (Heck, 1974).	26
3.10	Etapas da magnetização de um corpo, desde (a) a magnetização nula pela ausência de campo magnético até (d) à saturação. (Heck, 1974).	26
3.11	Alterações das estruturas dos domínios no processo de magnetização de um corpo ferromagnético (Somkun, 2010).	27
3.12	Esquema da estrutura cristalina dos aços elétricos de grão orientado (AK Steel, 2017).	29
3.13	Histereses magnética (a) e mecânica (b) (kaltenbacher et al., 2013).	40
3.14	Histereses magnética (a) e mecânica (b) (kaltenbacher et al., 2013).	41
3.15	Esquema de montagem da ponte de Epstein (IEC60404-2, 2008).	43
3.16	Junta double step-lap (IEC60404-2, 2008).	43
3.17	Esquema de montagem da ponte de Epstein para medição da potência de perdas pelo método do wattímetro (IEC60404-2, 2008).	44

3.18	Ponte de Lloyd-Fisher (a) (Stout, 1960) e ponte de Churcher (b) (Baldwin, 1973).	45
3.19	Esquema do sistema de medição criado por Gong et al. (2015).	47
3.20	Sistema de medição num ponto (à esquerda) e diferencial (à direita) (IEC TR 62581, 2010).	47
3.21	Vista lateral do sistema de medição (IEC TR 62581, 2010).	48
3.22	Tipos de <i>yoke</i> : horizontal simples (a), horizontal duplo (b), vertical simples (c) e vertical duplo(d) (IEC TR 62581, 2010).	49
3.23	Diferença percentual entre os valores da perdas específicas medidos e os calculados (Antonelli et al., 2005).	49
3.24	Transformador diferencial variável linear (electrical4u, 2009).	51
3.25	Sensores Capacitivos de Deslocamento (Whittaker, 1960).	51
3.26	Extensómetro (Sensorland, 2010).	52
3.27	Circuitos dos extensómetros em quarto de ponte (a), meia ponte (b) e ponte completa (c) (Sensorland, 2010).	52
3.28	Princípio de funcionamento de um vibrómetro laser Doppler.	53
3.29	Estrutura-base de um acelerómetro (Norton and Karczub, 2003).	54
3.30	Sistema para medição de magnetostrição utilizado dois acelerómetros (Anderson, 2000).	55
3.31	Conceito das Redes de Bragg em Fibra Ótica (Peters, 2009).	55
4.1	Esquema do provete do qual foram cortadas as amostras para análise.	61
4.2	Esquema das amostras montadas.	62
4.3	Máquina Struers Predopress utilizada para a montagem das amostras a quente.	62
4.4	Máquina Struers Rotopol-1 utilizada para o lixamento das amostras.	62
4.5	Máquina Struers Rotopol-1 utilizada para o polimento das amostras.	63
4.6	Microscópio Olympus BX51M utilizado para o registo fotográfico das amostras.	64
4.7	Superfície da amostra C após o ataque químico.	64
4.8	Superfície da amostra C após o ataque químico.	65
4.9	Registo fotográfico das amostras A1 (cima) e A2 (baixo).	65
4.10	Registo fotográfico das amostras B1 (cima) e B2 (baixo).	65
5.1	Esquema do circuito de alimentação da ponte Epstein.	69
5.2	Chapa instrumentada com o extensómetro e utilizada nas medições.	70
5.3	Ponte de Epstein com a chapa com o extensómetro colado em posição.	70
5.4	Componentes do sistema de aquisição de dados da National Instruments.	71
5.5	Esquema do circuito de alimentação da ponte Epstein com os módulos de aquisição de tensão e corrente.	71
5.6	Código LabVIEW para receber os dados medidos e configurar o hardware.	72
5.7	Código LabVIEW para o cálculo da indução magnética.	72
5.8	Função $B(t)$ antes da correção do declive provocado pela integração (a) e depois da correção (b).	73
5.9	Código LabVIEW para o cálculo da intensidade de campo magnético H	73
5.10	Espectro de sinal de magnetostrição obtido nas medições preliminares.	74
5.11	Conjunto de filtros utilizados para filtragem dos sinais de deformação.	75
5.12	Interface do <i>Filter VI</i> do LabVIEW.	76

5.13	Código LabVIEW para representação do ciclo de histerese.	76
5.14	Código LabVIEW para representação da curva de borboleta.	77
5.15	Cabeçalho, botões de início e paragem e separadores da aplicação msLAB.	77
5.16	Sub-separador <i>Aquisition</i> do separador <i>Setup</i> da aplicação msLAB.	77
5.17	Sub-separador <i>Playback</i> do separador <i>Setup</i> da aplicação msLAB.	78
5.18	Sub-separador <i>Rolling Direction Strain</i> do separador <i>Mechanical Measurements</i> da aplicação msLAB.	78
5.19	Sub-separador <i>Tranverse Direction Strain</i> do separador <i>Mechanical Measurements</i> da aplicação msLAB.	79
5.20	Separador <i>Electrical Measurements</i> da aplicação msLAB.	79
5.21	Separador <i>Outputs</i> da aplicação msLAB.	80
5.22	Separador <i>Magnetostriction</i> da aplicação msLAB.	80
5.23	Secção da folha de cálculo onde são introduzidos e selecionados os valores medidos de indução e magnetostricção e calculados os valores de pico-a-pico e pico.	82
5.24	Secção da folha de cálculo onde são introduzidos os valores de amplitude dos ciclos em função frequência e selecionados os valores das frequências fundamentais da magnetostricção e calculados os valores de ruído de ponderação A.	83
5.25	Secção da folha de cálculo onde são criados gráficos a partir dos dados introduzidos na folha.	83
5.26	Folha de cálculo onde são representados os gráficos de comparação dos vários ensaios.	84
5.27	Secção da folha de cálculo onde são representados gráficos dos sinais de corrente e de tensão a partir dos valores de medidos.	84
5.28	Secção da folha de cálculo onde são representados os espectros dos sinais de tensão medidos.	85
5.29	Secção da folha de cálculo onde são representados os espectros dos sinais de corrente medidos.	85
5.30	Folha de cálculo para análise dos ciclos de histerese.	86
6.1	Excerto do sinal de tensão da medição com 4 Chapas a 1.75 T.	90
6.2	Excerto do sinal de corrente da medição com 4 Chapas a 1.75 T.	90
6.3	Espetro do sinal de tensão da medição com 4 Chapas a 1.75 T.	90
6.4	Espetro do sinal de corrente da medição com 4 Chapas a 1.75 T.	91
6.5	Exemplo da variação da tensão com o aumento da indução magnética (medição com 4 Chapas).	91
6.6	Exemplo da variação da corrente com o aumento da indução magnética (medição com 4 Chapas).	91
6.7	Exemplo de sinal de magnetostricção não-filtrado (medição com 1 Chapa a 1.75 T).	92
6.8	Exemplo de curva de borboleta traçada com o sinal de magnetostricção não-filtrado (medição com 1 Chapas a 1.75 T).	92
6.9	Exemplo de sinal de magnetostricção filtrado (medição com 1 Chapa a 1.75 T).	92
6.10	Exemplo de curva de borboleta traçada com o sinal de magnetostricção filtrado (medição com 1 Chapas a 1.75 T).	93

6.11	Indução e magnetostricção sem acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapas a 1.75 T).	93
6.12	Exemplo de curvas de borboleta relativas à magnetostricção na direção da laminagem de um núcleo de aço elétrico para induções magnéticas máximas entre 1.2 e 1.9 T (IEC60076-10-1, 2016).	94
6.13	Indução e magnetostricção com acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapa a 1.75 T).	94
6.14	Exemplo de curva de borboleta com acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapa a 1.75 T).	95
6.15	Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da chapa determinado sem as fases dos sinais acertada.	95
6.16	Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa determinados sem as fases dos sinais acertadas.	96
6.17	Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da chapa determinado com as fases dos sinais acertadas.	96
6.18	Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa determinados com as fases dos sinais acertadas.	97
6.19	Valores de pico-a-pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da chapa.	97
6.20	Valores de pico-a-pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa.	97
6.21	Curvas de borboleta na direção da laminagem das medições a 1.5, 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.8 e 1.85 e 1.9 T de indução magnética.	99
6.22	Curvas de borboleta na direção da laminagem das medições a 1.5, 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.8 e 1.85 e 1.9 T de indução magnética.	100
6.23	Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.5T.	101
6.24	Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.5T.	101
6.25	Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.75T.	101
6.26	Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.75T.	102
6.27	Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.9T.	102
6.28	Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.9T.	102
6.29	Níveis de aceleração da magnetostricção de ponderação A na direção da laminagem.	103
6.30	Níveis de aceleração da magnetostricção de ponderação A na direção transversal à laminagem.	103
6.31	Níveis de velocidade da magnetostricção de ponderação A na direção da laminagem.	104
6.32	Níveis de velocidade da magnetostricção de ponderação A na direção transversal à laminagem.	104
8.1	Plano de Testes.	124

8.2	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1 chapa relativas à direção da laminagem da chapa.	125
8.3	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1 chapa relativas à direção transversal à laminagem da chapa.	125
8.4	Curvas de borboleta e espectros das medições com 2 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.	126
8.5	Curvas de borboleta e espectros das medições com 2 chapas relativas à direção transversal à laminagem da chapa.	126
8.6	Curvas de borboleta e espectros das medições com 4 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.	127
8.7	Curvas de borboleta e espectros das medições com 4 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	127
8.8	Curvas de borboleta e espectros das medições com 8 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.	128
8.9	Curvas de borboleta e espectros das medições com 8 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	128
8.10	Curvas de borboleta e espectros das medições com 12 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.	129
8.11	Curvas de borboleta e espectros das medições com 12 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	129
8.12	Curvas de borboleta e espectros das medições com 15 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.	130
8.13	Curvas de borboleta e espectros das medições com 15 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	130
8.14	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.	131
8.15	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	131
8.16	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.25 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.	132
8.17	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.25 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	132
8.18	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.5 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.	133
8.19	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.5 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	133
8.20	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.6 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.	134
8.21	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.6 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	134
8.22	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.65 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.	135

8.23	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.65 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	135
8.24	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.7 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa. . .	136
8.25	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.7 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	136
8.26	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.75 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa. . .	137
8.27	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.75 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	137
8.28	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.8 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa. . .	138
8.29	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.8 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	138
8.30	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.85 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa. . .	139
8.31	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.85 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	139
8.32	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.9 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa. . .	140
8.33	Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.9 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.	140

ÍNDICE DE TABELAS

3.1	Tipos de chapa utilizados pela EFACEC (ThyssenKrupp Electrical Steel, 2015).	31
3.2	Designação dos aços elétricos segundo a Norma EN 10027-1:2005 (EN10027-1, 2005).	32
3.3	Propriedades físicas típicas dos aços utilizados pela EFACEC (ThyssenKrupp Electrical Steel, 2015).	32
3.4	Número mínimo de provetes em teste em função da espessura da chapa (IS 649, 1997).	45
3.5	Comparação dos transdutores.	56

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Âmbito e Motivações do Trabalho	3
1.2	Objetivos do Trabalho	3
1.3	Organização do Trabalho e Estrutura da Dissertação	4
2	ELETROMAGNETISMO E TRANSFORMADORES	7
2.1	Fundamentos do Eletromagnetismo	7
2.2	Transformador Elétrico	7
2.2.1	Transformador Ideal	8
2.2.2	Transformador Real	10
2.2.3	Tipos de Transformadores	12
2.2.4	Transformador Trifásico	13
2.2.5	Aspetos Construtivos da Parte Ativa	15
3	MATERIAIS MAGNÉTICOS E MAGNETOSTRIÇÃO	21
3.1	Classificação dos Materiais quanto ao Comportamento Magnético	21
3.1.1	Diamagnetismo	21
3.1.2	Paramagnetismo	22
3.1.3	Ferromagnetismo	22
3.1.4	Ferrimagnetismo	23
3.1.5	Antiferromagnetismo	23
3.2	Aços Elétricos	23
3.2.1	Comportamento característico	23
3.2.2	Aços Elétricos para Núcleos de Transformadores	27
3.2.3	Tipos de Chapa Utilizados pela EFACEC	31
3.3	Magnetostricção	33
3.3.1	Ruído	34
3.3.2	Ensaio para determinação dos Níveis de Ruído	37
3.3.3	Avaliação da emissão de ruído	37
3.4	Influência de Processos de Conformação e Corte da Chapa Magnética na Magnetostricção	39
3.5	Modelos Constitutivos da Magnetostricção	39
3.5.1	Equações Constitutivas da Magnetostricção	40
3.5.2	Modelo Baseado nas Características do Material	41
3.6	Métodos de Medição da Magnetostricção	42
3.6.1	Ponte de Epstein	42
3.6.2	Single Sheet Tester	46
3.6.3	Comparação dos Métodos de Medição da Magnetostricção	48
3.7	Aquisição e análise de dados	50
3.8	Sensorização e Instrumentação	50
4	ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CHAPA MAGNÉTICA	61
4.1	Descrição do Problema	61
4.2	Preparação de Amostras	61

4.2.1	Corte	61
4.2.2	Montagem das Amostras	61
4.2.3	Lixamento	62
4.2.4	Polimento	63
4.2.5	Ataque Químico	63
4.2.6	Registo Fotográfico	64
4.3	Resultados	64
5	SISTEMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO	69
5.1	Sistema Experimental	69
5.2	Sistema de Aquisição de Dados	70
5.3	Programação em LabVIEW e Análise de Dados	71
5.3.1	Aplicação msLab Desenvolvida em LabVIEW	71
5.3.2	Folhas de Cálculo	81
6	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
6.1	Condições de Teste e Ensaio	89
6.2	Resultados	89
6.2.1	Comportamento da Corrente e da Tensão	89
6.2.2	Filtragem dos Sinais de Magnetostricção	89
6.2.3	Acerto de Fase dos Sinais de Magnetostricção e Indução Magnética	93
6.2.4	Determinação do Ensaio que Melhor Caracteriza o Comportamento da Chapa	94
6.2.5	Aceleração e Velocidade Características da Magnetostricção de Ponderação A	103
7	CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	107
7.1	Conclusões	107
7.2	Proposta de Trabalhos Futuros	108
8	BIBLIOGRAFIA	111

INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

A invenção do transformador de potência no final do século XIX tornou possível o desenvolvimento do sistema de distribuição de tensão alternada (AC) atual, com centrais elétricas que muitas vezes estão localizadas a muitos quilômetros dos locais de consumo. Gradualmente e à medida que as necessidades o exigiam, surgiram transformadores de grande capacidade e, com o passar do tempo, a eficiência foi aumentando e o tamanho diminuído.

Nos últimos anos, um dos requisitos de exclusão que se tem verificado aquando da aquisição de transformadores é o nível de ruído produzido pelos mesmos, que deve ser o mais baixo possível para minimizar o incómodo quando instalados na proximidade de habitações. Por esse motivo, há um crescente interesse por parte dos fabricantes em perceber quais os fenómenos que estão envolvidos na geração de ruído e vibrações em transformadores de potência com vista à sua atenuação.

A principal fonte de vibração/ruído existente no transformador está associada à deformação mecânica (magnetostricção) do núcleo provocada pelo campo magnético alternado que lhe é induzido pelos enrolamentos. Este fenómeno pode ser atenuado com uma escolha adequada dos materiais e processos de fabrico e projetando o transformador de forma a que a pré-tensão aplicada no núcleo sejam baixas.

Atualmente, existe alguma controvérsia no que toca à identificação do método mais adequado para a caracterização experimental da magnetostricção, razão pela qual é de extrema importância para a EFACEC adquirir e aprofundar conhecimentos neste tema de forma a possibilitar a incorporação de informação mais detalhada relativa à magnetostricção da chapa magnética nos modelos de previsão de ruído presentemente a serem desenvolvidos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os temas a investigar nesta dissertação inserem-se na problemática do ruído causado pela magnetostricção em transformadores de potência. Assim, como objetivo geral desta dissertação, pretende-se aumentar o nível de conhecimento do fenómeno e endogeneizar internamente na EFACEC as metodologias com vista à caracterização experimental desse fenómeno e minimização dos seus efeitos na geração de ruído.

Os objetivos específicos da dissertação são identificar os tipos de chapa ferromagnética mais utilizados, propriedades que os tornam adequados a esta aplicação e identificar os aspetos construtivos, metalúrgicos e os processos de fabrico que mais influenciam a magnetostricção da chapa do núcleo do transformador, com vista ao melhor controlo interno do processo de fabrico do núcleo magnético e elaboração de uma instrução operacional a ser aplicada na montagem de transformadores de baixo ruído. Além disso,

pretende-se averiguar qual a solução de instrumentação mais adequada para medição da magnetostrição e evoluir o sistema experimental do tipo ponte de Epstein existente na EFACEC, anteriormente usado para a caracterização das perdas na chapa, para caracterização experimental da magnetostrição de chapa magnética.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada tendo como base os objetivos descritos anteriormente. No Capítulo 1 é feita uma introdução com o propósito de identificar o âmbito do trabalho e os seus objetivos.

Para enquadramento com o problema, produto e a sua física, Capítulo 2, são revistos alguns conceitos de eletromagnetismo essenciais à compreensão das matérias abordadas nos capítulos seguintes. É também feita uma abordagem ao transformador no que diz respeito ao princípio de funcionamento, aos tipos a aspetos construtivos e aos processos de fabrico habituais.

De seguida, é feita uma revisão de conceitos relacionados com os materiais magnéticos, no Capítulo 3, e são especialmente abordados os aços elétricos. Posteriormente, é descrito o fenómeno da magnetostrição e são formulados os conceitos teóricos que o fundamentam e elencadas as principais abordagens de modelização disponíveis na literatura. São ainda enumerados e analisados os principais métodos e instrumentação para a sua medição.

No Capítulo 4 é feita uma análise metalográfica à chapa magnética, cujos procedimentos e resultados são apresentados.

Na sequência, são descritos no Capítulo 5 os sistemas experimental e de aquisição de dados existentes na EFACEC e descreve-se a aplicação desenvolvida em LabVIEW para efetuar a aquisição, processamento e gravação dos dados obtidos nas medições.

No capítulo 6 os procedimentos de teste são descritos e os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugeridas perspectivas para a sua continuidade no futuro.

Por último, no Capítulo 8 são indicadas as referências bibliográficas. O Capítulo 9 é o Apêndice e nele está incluída alguma informação complementar do trabalho.

ELETROMAGNETISMO E TRANSFORMADORES

2.1 FUNDAMENTOS DO ELETROMAGNETISMO

2.2 TRANSFORMADOR ELÉTRICO

2 ELETROMAGNETISMO E TRANSFORMADORES

2.1 FUNDAMENTOS DO ELETROMAGNETISMO

Maxwell explicou que o campo magnético resulta do movimento de cargas elétricas. Por isso, a variação de um campo elétrico gera um campo magnético e, da mesma forma, a variação da indução magnética resulta num campo elétrico. O conceito de eletromagnetismo resulta dessa interdependência entre campo elétrico e campo magnético.

A intensidade do campo magnético H (A/m) e a densidade de fluxo magnético B ($T=Wb/m^2$) são os parâmetros magnéticos mais comuns e a relação fundamental entre eles no vácuo é dada por

$$B = \mu_0 H, \quad (2.1)$$

em que $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ (H/m) é a permeabilidade magnética do vácuo. A densidade de fluxo magnético B (por vezes também designada por indução magnética) é um parâmetro que relaciona o fluxo magnético ϕ (Wb) com a área A (m^2) atravessada pelo mesmo,

$$B = \frac{\phi}{A}. \quad (2.2)$$

Através destes parâmetros definem-se, para além da permeabilidade, outros igualmente importantes no magnetismo, tais como, as perdas, a polarização, a magnetização e a curva de magnetização (Tumanski, 2011).

Lorentz demonstrou que um campo eletromagnético atua sob a forma de uma força \mathbf{F} sobre uma carga q que se desloca a uma velocidade \mathbf{v} . Geralmente esta força pode ser dividida em duas partes, a primeira provocada pelo campo elétrico \mathbf{E} ,

$$\mathbf{F}' = q\mathbf{E}, \quad (2.3)$$

a segunda provocada pelo campo magnético H ,

$$\mathbf{F}'' = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (2.4)$$

Juntando as duas equações obtém-se,

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (2.5)$$

Num campo eletromagnético, o campo elétrico resulta numa força que atua sobre todas as cargas (estacionárias e em movimento), enquanto o campo magnético atua apenas em cargas em movimento.

2.2 TRANSFORMADOR ELÉTRICO

Um transformador é um dispositivo capaz de aumentar ou diminuir tensão com um decréscimo ou acréscimo correspondente em corrente (Singh, 2008). Na Figura 2.1 está

representado um esquema de um transformador monofásico. O núcleo (3) é feito de chapas finas de aço elétrico empilhadas para que haja um acoplamento magnético eficaz e densidades de fluxo elevadas (Sen, 2013) e suporta dois enrolamentos (1) e (2), que estão isolados um do outro. Se o enrolamento (1) for alimentado com uma tensão alternada V_1 , uma corrente I_1 passará nele, produzindo fluxo magnético ϕ com a frequência da tensão V_1 . Tendo o aço uma permeabilidade magnética μ que é tipicamente 800 a 1000 vezes superior à do ar, o fluxo magnético ϕ é conduzido quase na totalidade pelo núcleo. A pequena parte do fluxo que não o é, designa-se por fluxo de dispersão ϕ_1 e, como se dispersa no ar, não contribui para o processo de transformação de tensão. (Dasgupta, 2009)

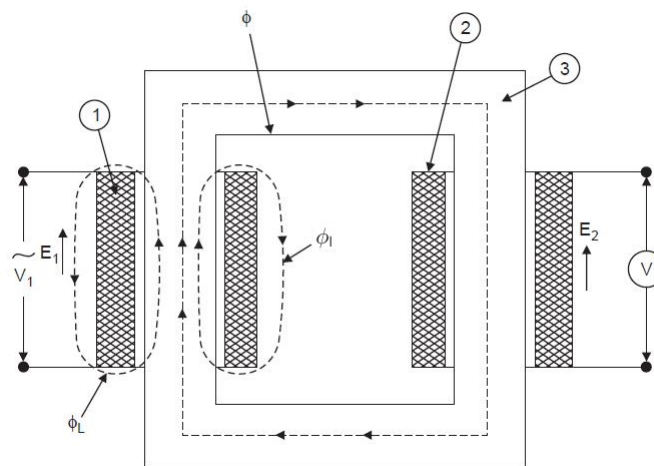


Figura 2.1: Esquema de transformador monofásico (Dasgupta, 2009).

2.2.1 TRANSFORMADOR IDEAL

Um transformador ideal é de conceção impossível na prática, isto porque, segundo Sen (2013), as resistências dos enrolamentos não são desprezáveis, a permeabilidade magnética do núcleo não é infinita ($\mu \rightarrow \infty$) e existem perdas no núcleo, uma vez que todos os fluxos não estão confinados ao núcleo e estão ligados a ambos os enrolamentos, ou seja, existem perdas de fluxo (fluxos de dispersão).

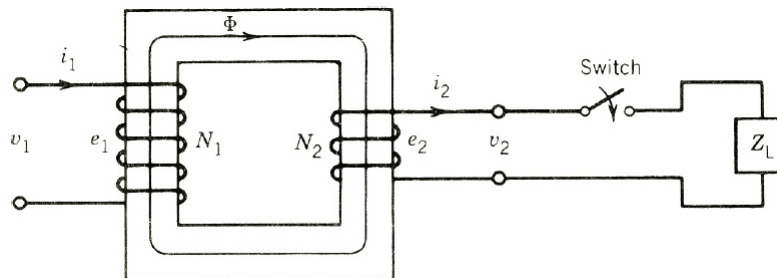


Figura 2.2: Transformador ideal (Sen, 2013).

No entanto, em condições ideais, considera-se que o enrolamento primário N_1 é ligado a uma fonte de tensão alternada v_1 e é estabelecido um fluxo magnético alternado ϕ no núcleo. Uma força electromotriz e_1 é induzida no enrolamento e será igual à tensão

aplicada, uma vez que a resistência do enrolamento é considerada desprezável, obtendo-se

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}. \quad (2.6)$$

O fluxo do núcleo também se liga ao enrolamento secundário N_2 e induz uma força eletromotriz e_2 que será igual à tensão no terminal v_2 ,

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}. \quad (2.7)$$

Combinando as equações 2.6 e 2.7 obtém-se

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a, \quad (2.8)$$

sendo que a é relação entre o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário, conhecida como relação de transformação. A equação 2.8 demonstra que as tensões nos enrolamentos de um transformador ideal são diretamente proporcionais ao número de voltas dos enrolamentos.

Quando uma corrente i_2 percorre o enrolamento secundário, o mesmo vai submeter o núcleo a uma força magnetomotriz (fmm) $N_2 i_2$. Isto faz com que uma corrente do enrolamento primário i_1 flua de maneira a que uma força magnetomotriz contrária $N_1 i_1$ se oponha à $N_2 i_2$. Se assim não fosse, $N_2 i_2$ faria o fluxo do núcleo variar drasticamente e o balanço entre v_1 e e_1 seria perturbado. Como num núcleo ideal a força magnetomotriz global necessária para estabelecer um fluxo é zero, as correntes nos enrolamentos são inversamente proporcionais ao número de voltas dos mesmos, de onde resulta que

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \text{fmm}_{\text{global}} = 0, \quad (2.9)$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2, \quad (2.10)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}. \quad (2.11)$$

Das equações 2.8 e 2.11 obtém-se

$$v_1 i_1 = v_2 i_2, \quad (2.12)$$

de onde se pode concluir que a potência de entrada no transformador é igual à de saída. Este comportamento é expectável uma vez que todas as perdas de potência no transformador ideal são ignoradas.

Caso a tensão de entrada v_1 seja sinusoidal, as equações 2.8, 2.11 e 2.12 podem ser escritas sob a forma de valores eficazes,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a, \quad (2.13)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}, \quad (2.14)$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2, \quad (2.15)$$

em que os valores eficazes de tensão, V_1 e V_2 , e corrente, I_1 e I_2 , são obtidos a partir dos respectivos valores de pico de tensão e corrente de acordo com as relações

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_{\text{pico}}}{\sqrt{2}}, \quad (2.16)$$

$$I_{\text{pico}} = \frac{I_{\text{eficaz}}}{\sqrt{2}}. \quad (2.17)$$

2.2.2 TRANSFORMADOR REAL

Como referido anteriormente, num transformador real os enrolamentos têm resistências, nem todos os enrolamentos ligam o mesmo fluxo, a permeabilidade do material do núcleo não é infinita e existem perdas quando o material do núcleo está sujeito a um fluxo variável ao longo do tempo.

Na prática a resistência do enrolamento pode ser representada esquematicamente como se estivesse em série com o enrolamento (Figura 2.3a). Quando as correntes atravessam os enrolamentos no transformador, estabelecem um fluxo resultante mútuo ϕ_m que é convergido para o núcleo magnético e uma pequena quantidade de fluxo de dispersão ϕ_l , que não converge para o núcleo. O fluxo de dispersão ϕ_l varia linearmente com a corrente e os seus efeitos podem ser representadas por uma indutância, designada por indutância de dispersão L_l , que pode ser calculada para os enrolamentos 1 e 2 através das expressões

$$L_{l1} = \frac{N_1 \phi_{l1}}{i_1}, \quad (2.18)$$

$$L_{l2} = \frac{N_2 \phi_{l2}}{i_2}. \quad (2.19)$$

A reactância X_l relativa à indutância que representa o fluxo de dispersão ϕ_l é definida por

$$X_l = 2\pi f L_l, \quad (2.20)$$

e, tal como a resistência do enrolamento, é colocada em série no circuito (Figura 2.3b).

Tendo o núcleo magnético permeabilidade finita, uma corrente de magnetização I_m é essencial para estabelecer um fluxo no núcleo. Esse efeito pode ser representado por uma indutância magnetizante L_m e as perdas no material magnético que constitui o núcleo podem ser representadas por uma resistência R_c . Na Figura 2.3c está representado um esquema do transformador real já com todas estas perdas contabilizadas.

As quantidades do primário do circuito do transformador ideal representado na Figura 2.3c podem ser movidas para a direita ou as do secundário para a esquerda. O circuito equivalente do transformador ideal com todas as quantidades à esquerda pode ser visto na Figura 2.3d. Por conveniência, geralmente representam-se todas as quantidades (tensões, correntes e impedâncias) num dos lados e o transformador ideal é omitido (Figura 2.3e). Analisando este circuito equivalente, as quantidades referidas podem ser

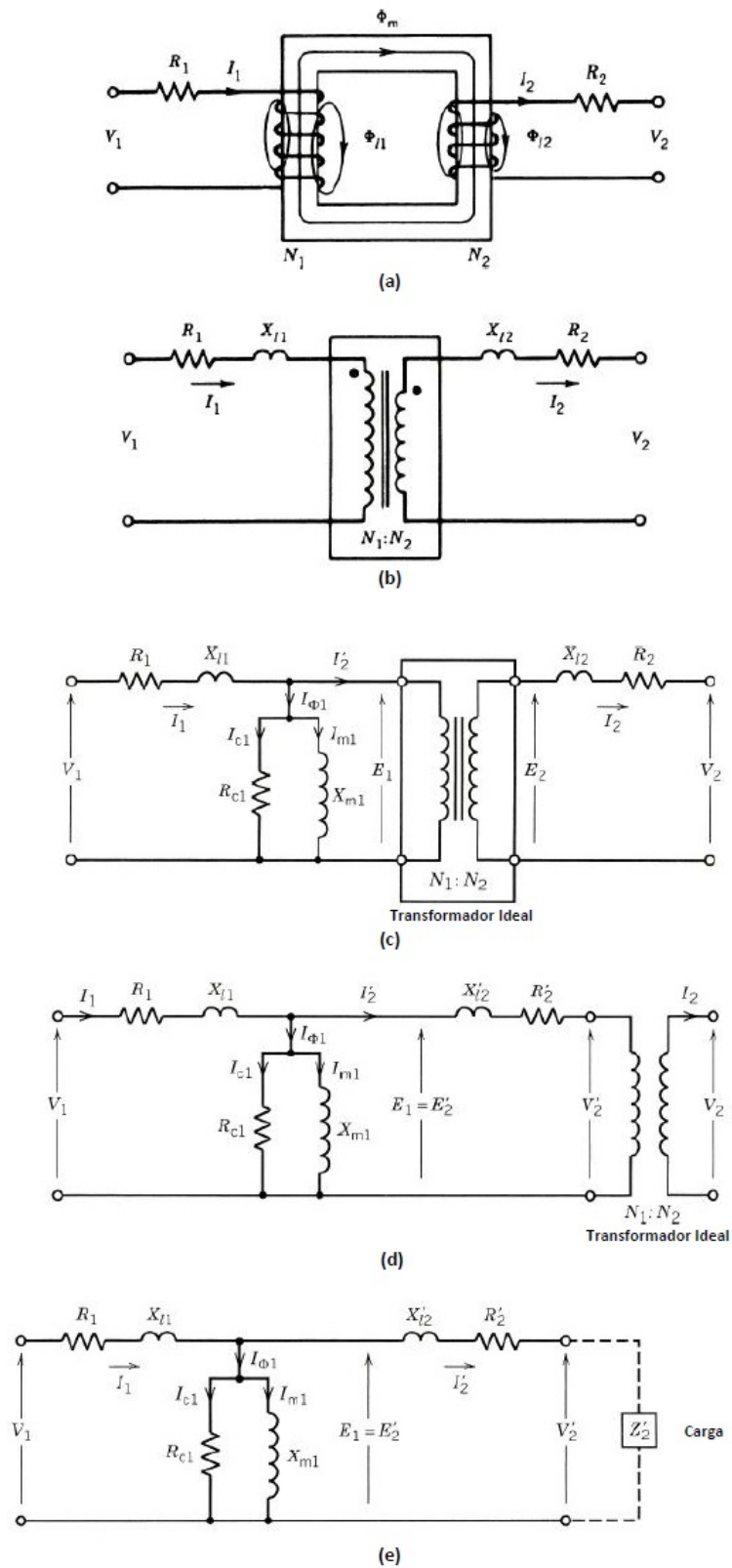


Figura 2.3: Desenvolvimento do circuito equivalente do transformador real (Sen, 2013).

avaliadas e as quantidades reais podem ser determinadas a partir delas se a relação de espiras for conhecida.

O modelo do circuito equivalente para o transformador real (Figura 2.3e) pode ser usado para prever o comportamento do transformador. Os parâmetros R_1 , X_{l1} , R_{c1} , X_{m1} , R_2 , X_{l2} e $a (= N_1/N_2)$ devem ser conhecidos para que o modelo de circuito equivalente possa ser usado. Se todos os dados de projeto do transformador forem conhecidos, esses parâmetros podem ser calculados a partir das dimensões e propriedades dos materiais utilizados. Por exemplo, as resistências dos enrolamentos (R_1 , R_2) podem ser calculadas a partir da resistividade dos fios de cobre, do comprimento total e da área da secção transversal do enrolamento. As indutâncias de magnetização L_m podem ser calculadas a partir do número de voltas do enrolamento e da relutância do percurso magnético. O cálculo das perdas de indutância (L_l) envolverá a contabilização de ligações de fluxo parcial e é, por isso, complexo. No entanto, existem fórmulas a partir das quais pode ser feita uma determinação fiável destas quantidades. Caso não sejam conhecidos todos os dados de projeto, os parâmetros podem ser determinados através de dois ensaios, um em vazio (ou em circuito aberto) e um em curto-circuito. Mais detalhes sobre a modelização de transformadores reais podem ser consultados em Sen (2013).

2.2.3 TIPOS DE TRANSFORMADORES

De acordo com a ABB (2004), os transformadores podem ser classificados segundo vários critérios, tais como, a finalidade, o tipo, o material do núcleo e o número de fases. Provavelmente, o critério para classificação de transformadores mais simples e mais claro é o número de fases que possuem, sendo que, podem ser monofásicos, se tiverem uma, ou trifásicos, se tiverem três (Sanchez and Banovic, 2014).

Em termos de tipo de construção, há dois formatos predominantes: *core* e *shell*. Nos transformadores do tipo *core* os enrolamentos rodeiam o núcleo e nos do tipo *shell* são rodeados pelo núcleo (McLyman, 2004). No entanto, este tipo de classificação é limitado, uma vez que há uma grande variedade de transformadores que não se enquadram nestes dois tipos de construção.

Outro critério de classificação possível é o fluido de arrefecimento, que pode ser líquido (óleo), gasoso ou inexistente, caso o transformador seja do tipo seco. Os transformadores com arrefecimento gasoso ou do tipo seco têm aplicações limitadas em sistemas de potência elevada.

Apesar de não ser perfeita, a classificação de transformadores mais prática e usada pela indústria é possivelmente a que os designa pela aplicação. Assim sendo, de acordo com este critério, podem ser de potência, de distribuição ou reatores. Ao classificá-los desta forma são levantadas várias questões, tais como, o facto de não existirem razões óbvias para se classificar um transformador como sendo de distribuição, em vez de potência. Algumas empresas definem como transformadores de distribuição os que forem de potência inferior a 10 MVA. No entanto, os valores 2.5 e 5 MVA são considerados limites por outras fontes em vez de 10 MVA. Esta classificação é ainda mais ambígua no que toca aos reatores, por não se tratarem de transformadores, apesar de normalmente se-

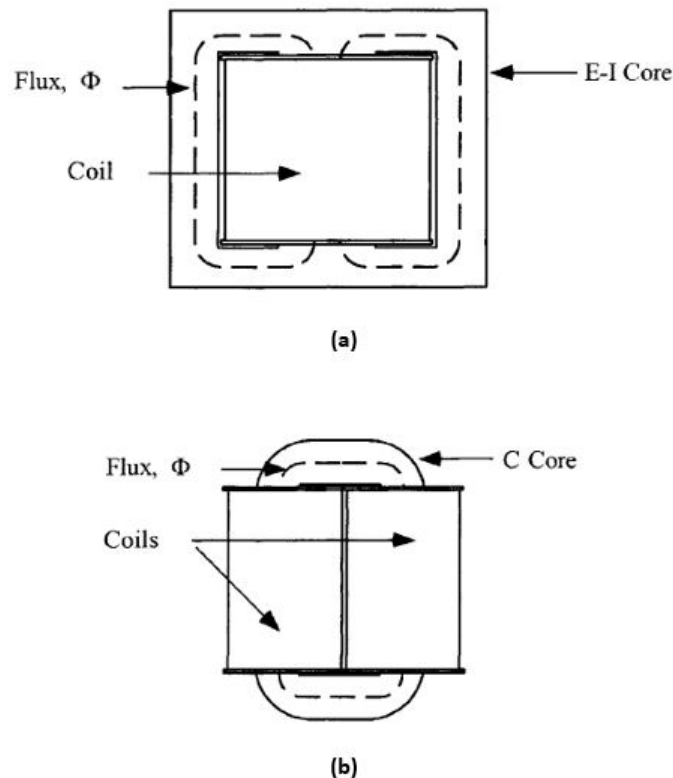


Figura 2.4: Transformador do tipo *shell* (a) e do tipo *core* (b) (Mclyman, 2004).

rem agrupados a eles por partilharem a maior parte da tecnologia e por serem projetados e produzidos nas fabricas dos transformadores (Sanchez and Banovic, 2014).

2.2.4 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Um sistema trifásico é usado para gerar ou transmitir energia elétrica em grandes quantidades. São necessários transformadores trifásicos para aumentar ou diminuir a tensão nas várias fases de transmissão desses sistemas. Estes transformadores podem ser construídos de duas formas: juntando 3 transformadores monofásicos ou construindo um transformador trifásico numa estrutura magnética comum (Sen, 2013).

O conceito do transformador trifásico com uma estrutura magnética comum está ilustrado na Figura 2.5, onde em 2.5a estão três transformadores monofásicos do tipo *core* unidos sem os enrolamentos secundários representados. Se forem aplicadas tensões trifásicas sinusoidais equilibradas aos enrolamentos, os fluxos Φ_a , Φ_b e Φ_c também serão sinusoidais e equilibrados. Como as três pernas que transportam o fluxo estão unidas, o somatório dos três fluxos será zero, o que faz com que a perna central seja obsoleta e possa ser removida, como representado na Figura 2.5b. Tendo em conta que uma estrutura com aquela geometria não é de fácil construção, a alternativa mais vulgar é colocar a perna *b* entre as pernas *a* e *c*, como representado em (c). Em (d) pode ver-se um esquema da forma final do transformador. Os enrolamentos primário e secundário de cada fase estão posicionados na mesma perna.

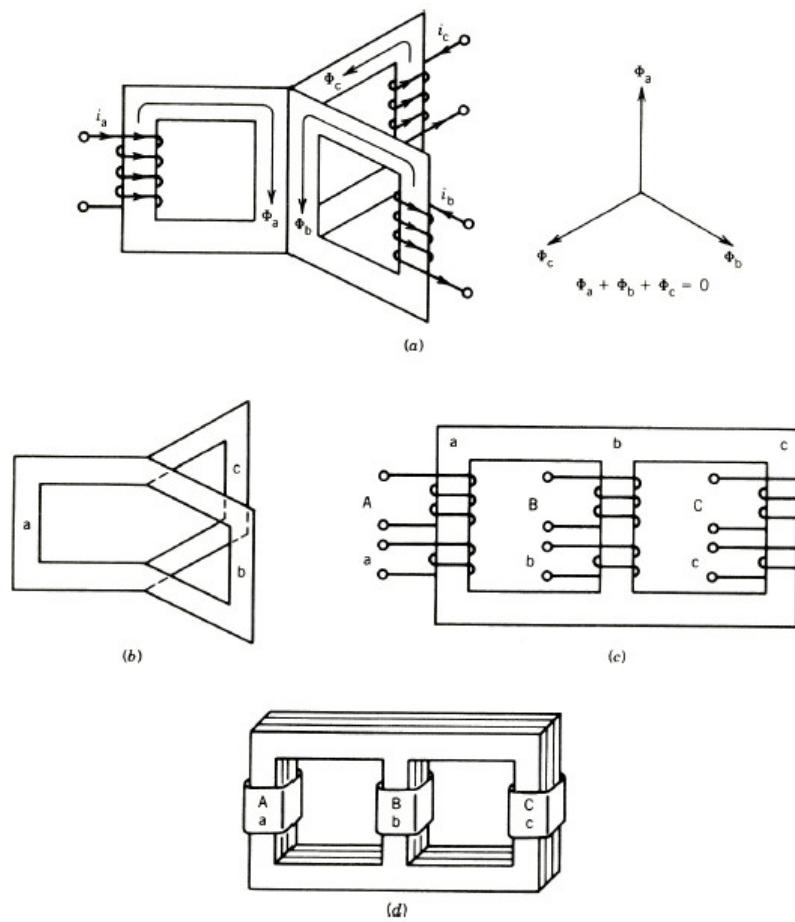


Figura 2.5: Desenvolvimento de um transformador trifásico do tipo *core* (Sen, 2013).

Segundo Sanchez and Banovic (2014), as razões para usar uma unidade com três transformadores monofásicos em vez de uma unidade trifásica, são a possibilidade de ter uma quarta unidade idêntica como reserva e possíveis limitações durante o fabrico e o transporte. No entanto, um único transformador trifásico é cerca de 15% mais barato e ocupa menos espaço.

2.2.5 ASPETOS CONSTRUTIVOS DA PARTE ATIVA

O circuito magnético é composto por colunas, onde são colocados os enrolamentos, e por culassas, que unem as colunas. Os espaços entre colunas e culassas, por onde passam os enrolamentos, denominam-se por janelas.

O núcleo pode ser construído segundo dois modelos: construção do tipo *core* (Figura 2.6a) ou do tipo *shell* (Figura 2.6b). Nos transformadores do tipo *core* os enrolamentos rodeiam o núcleo quase por completo e nos do tipo *shell* verifica-se o inverso, o núcleo rodeia os enrolamentos (Moirá, 2003).

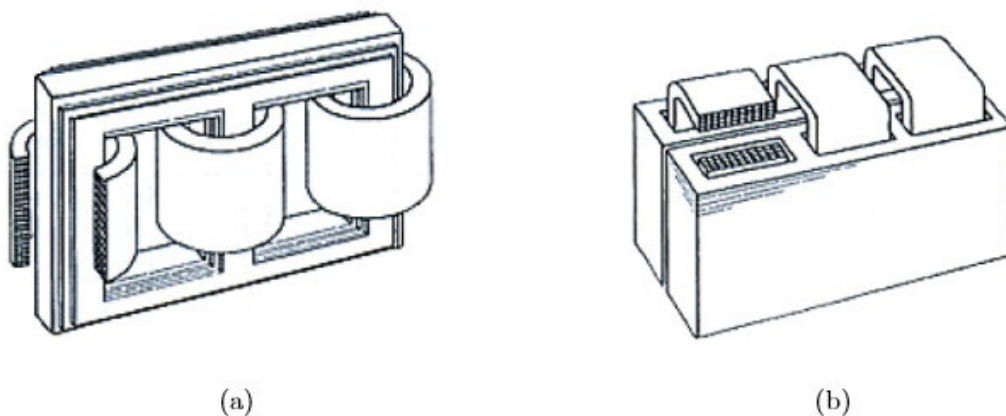


Figura 2.6: Transformadores trifásicos do tipo *core* (a) e do tipo *shell* (b) (ABB, 2004).

Na construção do tipo *core* os enrolamentos de alta e baixa tensão estão repartidos concentricamente por cada coluna do núcleo, sendo que os de baixa tensão (BT) ficam quase sempre no interior (mais perto do núcleo). Esta disposição deve-se ao facto de ser necessário colocar dois isolamentos de alta tensão (AT), um entre o circuito magnético e o enrolamento AT e outro entre os enrolamentos BT e AT, caso o enrolamento de alta tensão estivesse mais próximo do núcleo. Com os de BT no interior, são necessários dois isolamentos de BT, que são mais baratos do que os de AT (Say, 1955).

Na construção do tipo *shell*, os enrolamentos estão posicionados alternadamente em torno de parte do circuito magnético, com o restante núcleo a rodear estes enrolamentos.

Em transformadores de pequenas dimensões, por vezes utilizam-se colunas de secção retangular no núcleo, onde se colocam bobinas circulares ou retangulares. Com o aumento do tamanho do transformador, a utilização de bobinas circulares torna-se desejável por permitir poupar cobre. Se as colunas do núcleo tiverem secção quadrada, existe muito espaço não utilizado, visto que o comprimento da circunferência do enrola-

mento é superior ao perímetro da secção da coluna. Uma solução vulgar para minimizar as perdas provocadas pelas diferenças de perímetros é a criação de secções de colunas cruciformes compostas por dois ou mais tamanhos de chapa (Figura 2.7). Os ganhos obtidos com a redução de perdas devem ser equilibrados com o aumento do custo da mão de obra necessária para o corte e montagem de mais tamanhos de chapa e com a redução do espaço para refrigeração entre o núcleo e o enrolamento. Em transformadores maiores é impraticável cortar chapas com a forma de circuitos magnéticos completos, pois levaria a desperdícios de material e dificuldades em inserir as bobinas nos núcleos, visto que cada volta teria que ser enrolada em separado (Say, 1955).

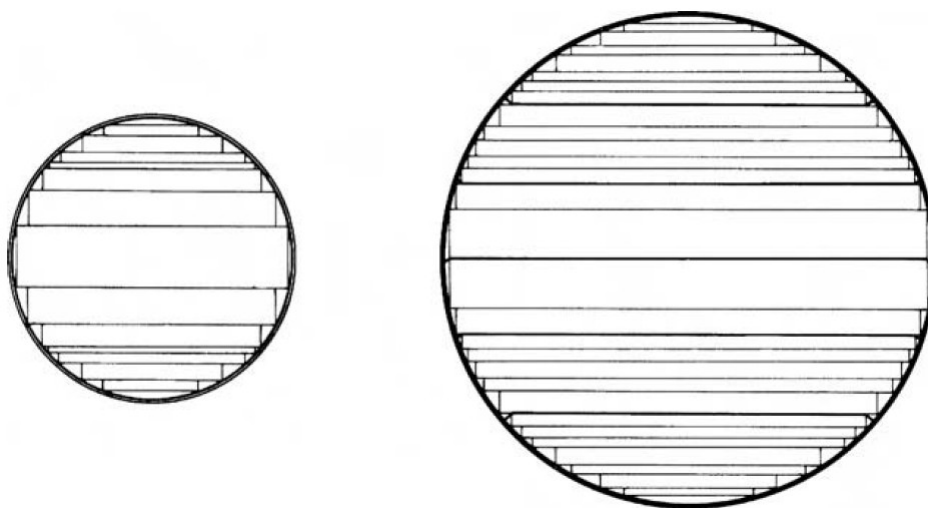


Figura 2.7: Preenchimento da área limitada pelo enrolamento com vários tamanhos de chapa (ABB, 2004).

O primeiro passo do fabrico do núcleo de um transformador é o corte das chapas ferromagnéticas que o constituem. As chapas laterais e dos topos são cortadas a um ângulo de 45° nas extremidades para se obter uma secção de transição maior e, conseqüentemente, uma menor densidade de fluxo (ABB, 2004). As dos topos, além destes cortes, recebem um corte central em forma de "V" para permitirem um encaixe das interiores com o menor número de juntas possível (Figura 2.8) (Dasgupta, 2009).

Ao procedimento de corte, segue-se o empilhamento as chapas, que deve ser feito de forma a que as uniões das colunas às culassas tenham a menor folga possível para minimizar a relutância do circuito magnético na circulação entre chapas. O empilhamento pode ser do tipo convencional ou *step-lap*. Na construção do tipo convencional, as colunas e culassas montam-se separadamente e só depois se unem. Na construção *step-lap*, o núcleo magnético é montado de uma vez, encaixando as chapas cada uma desfasada em relação à anterior e seguinte. Esta montagem, apesar de mais complexa do que a anterior, possui uma maior estabilidade mecânica e menor relutância global do circuito magnético e, conseqüentemente, da componente magnetizante da corrente em vazio e das perdas magnéticas nas juntas (Maira, 2003). A montagem *step-lap*, pode ter um ou mais desfasamentos, sendo que no primeiro caso se designa por *Single Step-Lap* (SSL) e *Multiple Step-Lap* (MSL) (Figura 2.9). As juntas MSL permitem que o fluxo magnético as percorra de modo mais fluído e conseqüentemente as perdas nas juntas e o nível de

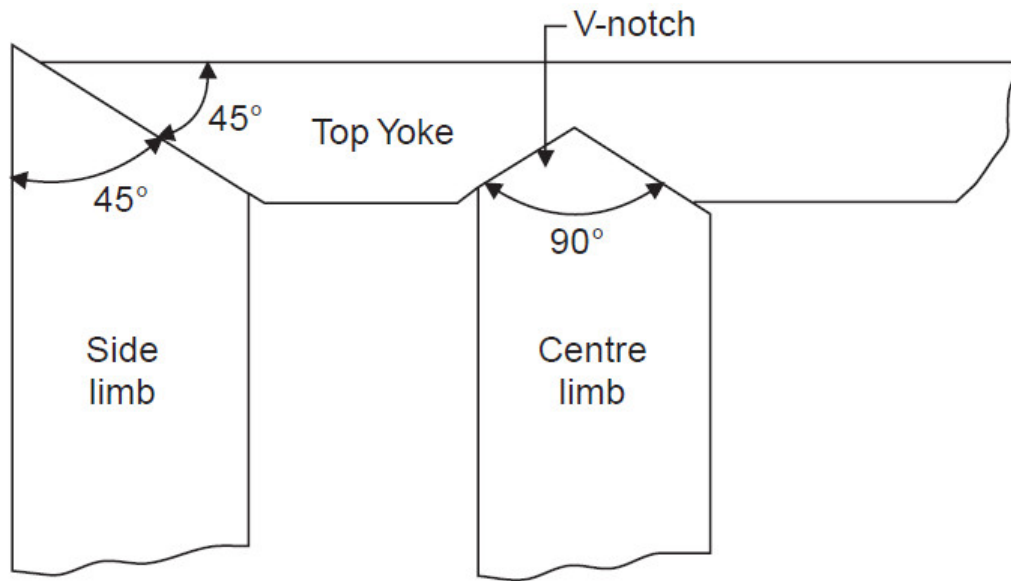


Figura 2.8: Ângulos de corte do núcleo (Dasgupta, 2009).

ruído produzido diminuem. Têm como desvantagens em relação às SSL o aumento do custo de fabrico das chapas, por serem de vários tamanhos diferentes, e da montagem, por ser mais complexa (Moirá, 2003). Em ambos os tipos de construção, há zonas nas juntas onde o fluxo não segue a direção da laminagem e, por este motivo, verifica-se um aquecimento local devido ao aumento das perdas no ferro.

Os processos de ligação mais utilizados para unir e fixar as chapas dos núcleos em transformadores são ligações aparafusadas ou recurso a bandas em aço, fibra de vidro ou madeira. No caso das ligações aparafusadas, as chapas possuem furos para acomodar os parafusos. Os parafusos devem ser isolados eletricamente do núcleo para evitar curto-circuitos ou correntes parasitas. A existência de furos nestas chapas causa interferências com o fluxo magnético que as percorre, pelo que se tem procurado substituir os furos e parafusos por bandas de aço (devidamente isoladas), fibra de vidro ou madeira que rodeiem o núcleo (Figura 2.10).

À ligação das chapas do núcleo segue-se a montagem dos enrolamentos. Para isso, a culassa superior é removida e os enrolamentos são elevados e inseridos verticalmente nas respetivas colunas. A culassa superior tem um papel fundamental no auxílio do posicionamento das chapas durante a montagem do núcleo, daí o facto de ser retirada antes da colocação dos enrolamentos e repostada depois, ao invés de ser apenas colocada no final da montagem. À medida que os enrolamentos vão sendo inseridos no núcleo, as bandas de fixação das chapas são sucessivamente removidas, uma vez que os enrolamentos na sua posição final fornecerão a rigidez necessária ao núcleo.

Por fim, é necessário ligar o núcleo à terra, para referenciar o potencial e evacuar as correntes parasitas que nele circulem ou descargas elétricas provocadas por curto-circuitos, e instalar a blindagem magnética (Healthcote, 1996).

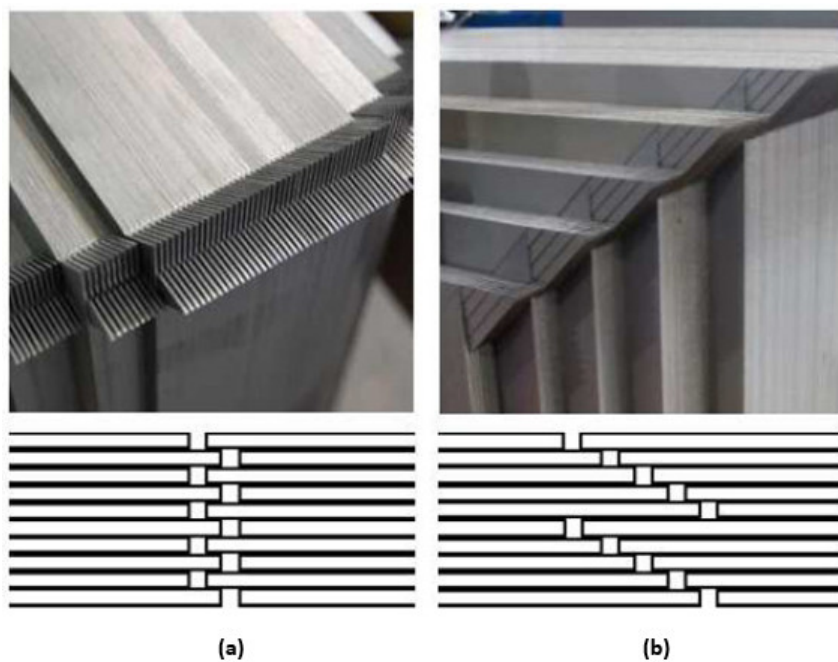


Figura 2.9: Empilhamento do tipo *single step-Lap* (SSL) (a) e do tipo *multiple step-lap* (MSL) (b) (Moirá, 2003).

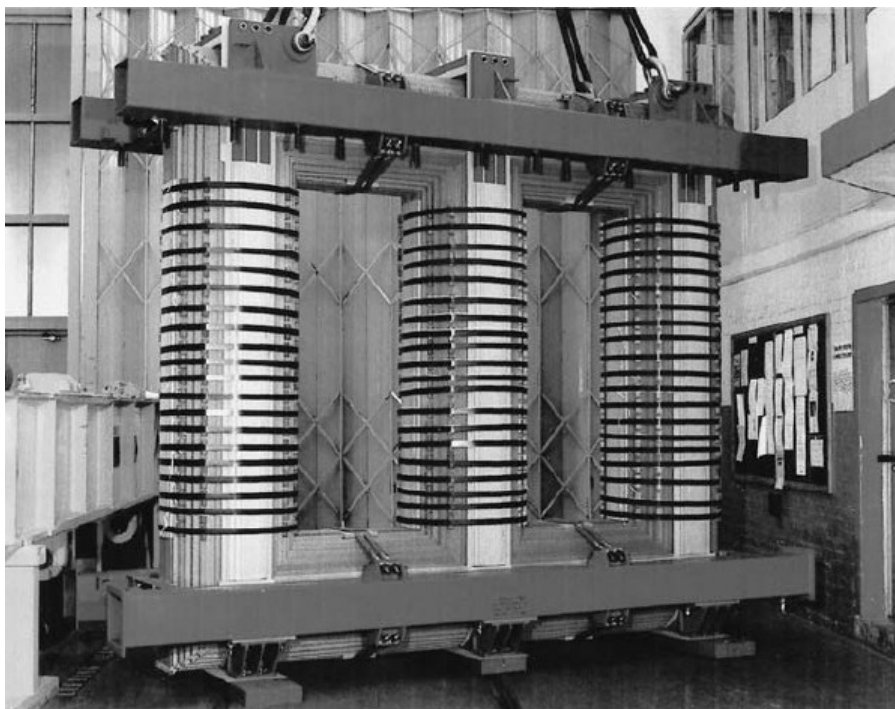


Figura 2.10: Núcleo de transformador trifásico com bandas de aço a ligar as chapas (Healthcote, 1996).

MATERIAIS MAGNÉTICOS E MAGNETOSTRIÇÃO

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO AO
COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

3.2 AÇOS ELÉTRICOS

3.3 MAGNETOSTRIÇÃO

3.4 INFLUÊNCIA DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E CORTE DA
CHAPA MAGNÉTICA NA MAGNETOSTRIÇÃO

3.5 MODELOS CONSTITUTIVOS DA MAGNETOSTRIÇÃO

3.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA MAGNETOSTRIÇÃO

3.7 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

3.8 SENSORIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

3 MATERIAIS MAGNÉTICOS E MAGNETOSTRIÇÃO

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO AO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO

A origem do magnetismo provém dos movimentos orbitais e de rotação dos elétrons e da interação entre eles (Moskowitz, 1991). A melhor forma de introduzir os diferentes tipos de magnetismo é descrevendo a forma como os materiais interagem com campos magnéticos. É sabido que todos os materiais são magnéticos, apesar de uns serem muito mais do que os outros. A principal razão é o facto de em alguns haver uma interação dos momentos atômicos e noutros não.

Os materiais magnéticos podem ser classificados em função do seu comportamento magnético, e podem ser diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos e anti-ferromagnéticos.

3.1.1 DIAMAGNETISMO

O diamagnetismo é uma propriedade fundamental de toda a matéria, embora seja geralmente muito fraco. É devido ao comportamento não cooperativo dos elétrons em órbita quando expostos a um campo magnético. As substâncias diamagnéticas são compostas por átomos que não possuem momentos magnéticos líquidos (ou seja, todas as camadas orbitais são preenchidas e não existem elétrons não emparelhados). No entanto, quando expostas a um campo, uma magnetização negativa é produzida e, por isso, a suscetibilidade é negativa. O gráfico da Figura 3.1a demonstra a magnetização M em função da intensidade de campo magnético H . Este tipo de substâncias caracteriza-se ainda por terem magnetização nula quando não estão na presença de um campo magnético e a sua suscetibilidade magnética χ ser independente da temperatura T (Figura 3.1b).

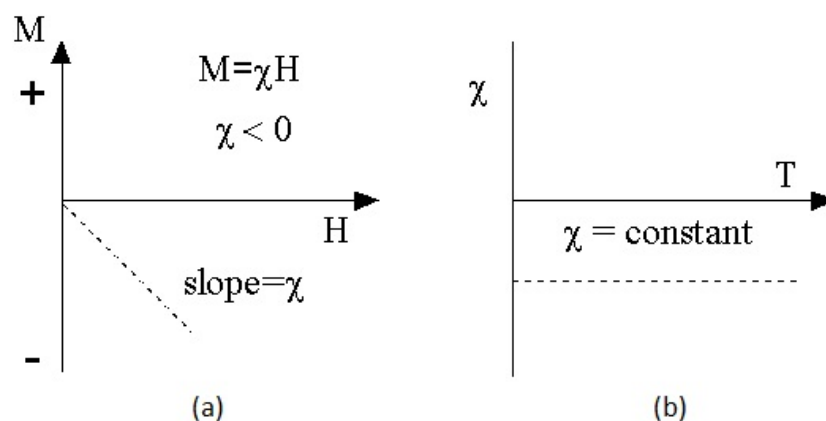


Figura 3.1: Comportamento magnético das substâncias diamagnéticas (Moskowitz, 1991).

3.1.2 PARAMAGNETISMO

Os materiais desta classe caracterizam-se por terem alguns dos átomos com momento magnético devido a elétrons não emparelhados em orbitais parcialmente preenchidas. No entanto, os momentos magnéticos individuais não interagem magneticamente e, tal como no caso das substâncias diamagnéticas, a magnetização é zero quando não estão submetidas a um campo magnético. Na presença de um campo magnético, dá-se um alinhamento parcial dos momentos magnéticos atômicos na direção do campo, que provoca uma magnetização e suscetibilidade magnética positivas (Figura 3.2a). Contrariamente às substâncias diamagnéticas, a suscetibilidade magnética das paramagnéticas depende da temperatura (Figura 3.2b). Esse efeito de dependência da temperatura designa-se por Lei de Currie.

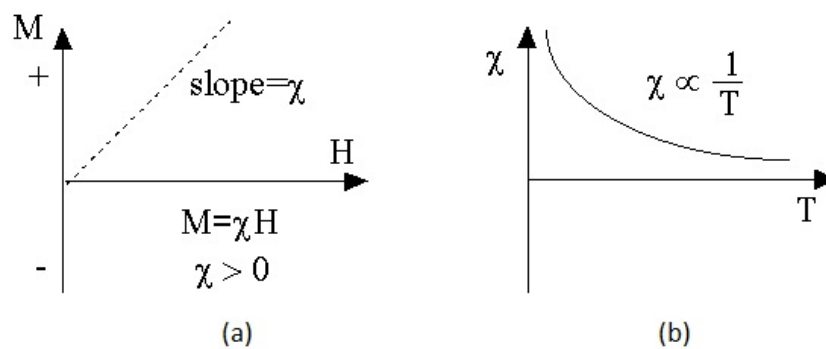


Figura 3.2: Comportamento magnético das substâncias paramagnéticas (Moskowitz, 1991).

3.1.3 FERROMAGNETISMO

Os momentos atômicos destes materiais apresentam, ao contrário dos paramagnéticos, interações muito fortes que são produzidas por forças de troca de elétrons e que resultam num alinhamento paralelo ou antiparalelo de momentos atômicos (Figura 3.3a). Embora essas forças nos materiais ferromagnéticos sejam muito grandes, podem ser eliminadas pela submissão do material à temperatura de Curie (T_c). Um gráfico típico de magnetização em função da temperatura para materiais ferromagnéticos é mostrado na Figura 3.3b.

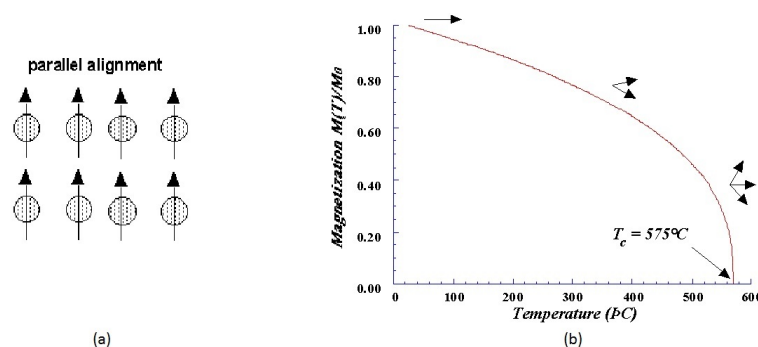


Figura 3.3: Esquema do alinhamento dos momentos magnéticos (a) e comportamento magnético em função da temperatura (b) das substâncias ferromagnéticas (Moskowitz, 1991).

3.1.4 FERRIMAGNETISMO

A estrutura magnética é composta por duas subestruturas magnéticas (chamadas A e B) separadas por aniões de oxigénio. As trocas de eletrões são mediadas pelos aniões de oxigénio, designam-se por interações indiretas e provocam um alinhamento anti-paralelo de rotações entre a subestruturas A e B (Figura 3.4a). Nos materiais ferrimagnéticos, os momentos magnéticos dos sublinhados A e B não são iguais e resultam num momento magnético (Figura 3.4b). São, por isso, materiais semelhantes aos ferromagnéticos, uma vez que exibem todas as características do comportamento ferromagnético (magnetização espontânea, temperaturas Curie, histerese e remanência), apesar de terem um ordenamento magnético muito diferente.

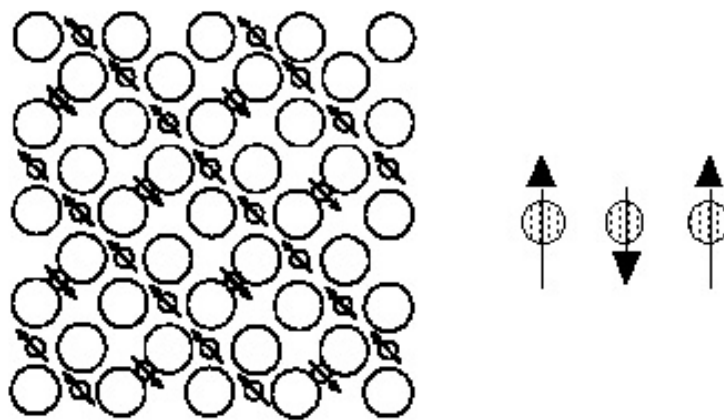


Figura 3.4: Esquema de alinhamento da estrutura atômica (a) e dos momentos magnéticos (b) dos materiais ferrimagnéticos (Moskowitz, 1991).

3.1.5 ANTIFERROMAGNETISMO

Se os momentos das subestruturas A e B forem exatamente iguais, mas opostos, o momento resultante é zero. Este tipo de ordenamento magnético é designado por antiferromagnetismo. O comportamento que indica que o material seja deste tipo é a suscetibilidade acima de uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Néel (T_N). Acima da T_N , a suscetibilidade obedece à lei de Curie-Weiss para os materiais paramagnéticos, mas com uma interceção negativa que indica interações de troca de eletrões negativas.

3.2 AÇOS ELÉTRICOS

3.2.1 COMPORTAMENTO CARACTERÍSTICO

Ciclo de Histerese

A histerese é um comportamento característico de praticamente todos os materiais ferromagnéticos (Bertotti, 1998). O ciclo de histerese típico está representado na Figura

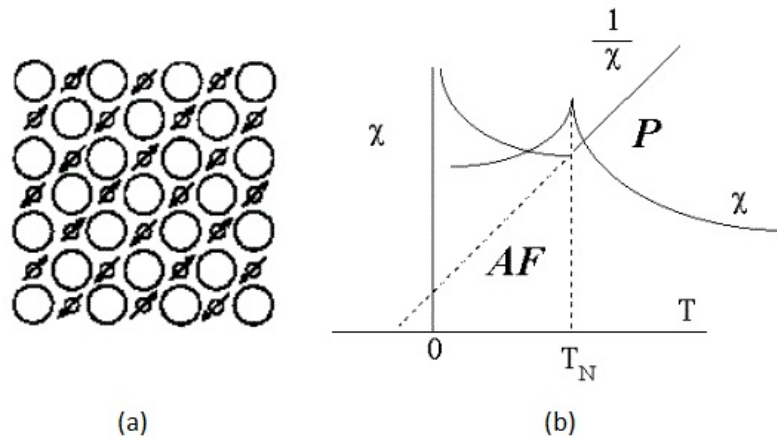


Figura 3.5: Esquema de alinhamento da estrutura atômica (a) e comportamento magnético em função da temperatura (b) das substâncias antiferromagnéticas (Moskowitz, 1991).

3.6. A curva que vai de 0 a 1, curva (0-1), é semelhante à curva de magnetização primária do material, quando se parte do estado desmagnetizado. Contudo, se a intensidade do campo magnético parar de aumentar e começar a diminuir, a curva de retorno (1-2) é diferente da de ascensão (0-1) devido às mudanças de posição das paredes domínios.

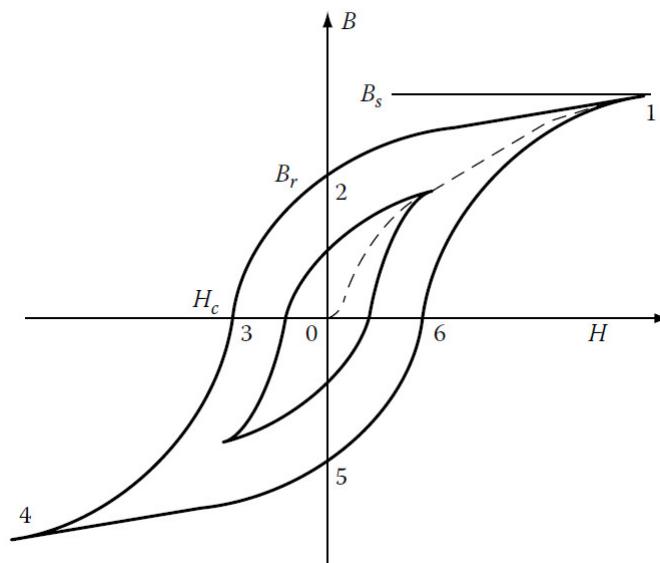


Figura 3.6: Ciclo de histerese típico e os seus pontos característicos (Tumanski, 2011).

Assim, apesar de no ponto 2 a intensidade do campo magnético ser zero, o material continua magnetizado. Esta magnetização é designada por residual ou densidade de fluxo remanescente (ou magnetização remanescente).

Para se levar a densidade de fluxo novamente a zero (ponto 3) é necessário aplicar um campo magnético na direção oposta, designado por coercividade H_c . A coercividade é um parâmetro dos materiais magnéticos muito importante porque as perdas magnéticas dependem da área do ciclo de histerese. Como tal, quanto menor o valor da coercividade, menores são as perdas de potência (Tumanski, 2011).

Domínios magnéticos

Em 1907, Pierre-Ernest Weiss introduziu a teoria dos domínios magnéticos que pretendia apresentar uma descrição da histerese existente nos materiais ferromagnéticos e os processos magnéticos que permitiam determiná-la (Heck, 1974). Essa teoria propõe que um corpo ferromagnético seja composto por muitos domínios pequenos, cada um deles espontâneo, magneticamente saturado e com sentido de campo magnético usualmente arbitrário, de modo a que, quando um corpo não esteja magnetizado, estes domínios se anulem entre si (Bardell and Moro, 1970).

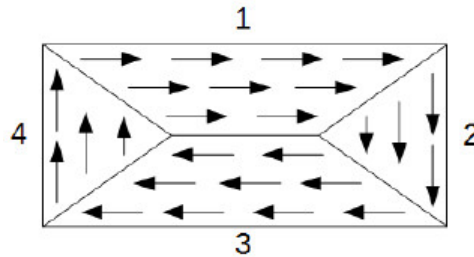


Figura 3.7: Corpo magnético com quatro domínios adjacentes (1,2,3 e 4) (Heck, 1974).

Cada domínio consiste num número de átomos com momentos magnéticos orientados no mesmo sentido. A Figura 3.7 demonstra, esquematicamente, os domínios de um corpo ferromagnético e os limites que os separam, observando-se que os campos magnéticos dos domínios estão distribuídos de modo a que as linhas de fluxo magnético se fechem e reduzam a energia magnética ao mínimo. Na Figura 3.8a está representada uma amostra composta por um só domínio, onde as linhas de campo magnético exteriores também são fechadas. É uma amostra que se comporta como um ímã e, por isso, é bastante sensível à ação de campos magnéticos exteriores. Se uma amostra idêntica estiver dividida em dois domínios magneticamente opostos (Figura 3.8b), o campo magnético exterior diminui drasticamente. Com o aumento do número de divisões, pode desaparecer totalmente como mostra a Figura 3.8c. (Heck, 1974)

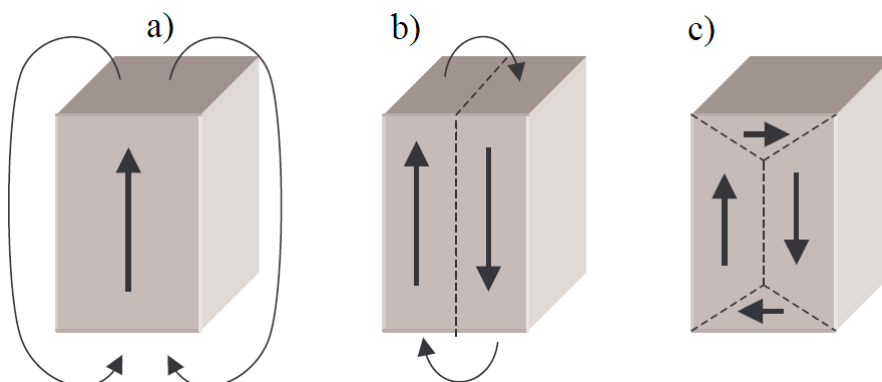


Figura 3.8: Campo magnético de corpos com vários domínios (Zureks, 2008).

O momento magnético de um domínio é determinado pelo seu volume, pela magnitude e pelo sentido do seu campo magnético, sendo assim possível criar uma alteração

do momento magnético alterando o volume ou sentido do domínio. A mudança de volume dos domínios produz-se com o deslocamento das suas paredes, como mostra na Figura 3.9, e a mudança no sentido do domínio implica a sua rotação. Supõe-se ainda que estas alterações possam ser reversíveis ou irreversíveis.

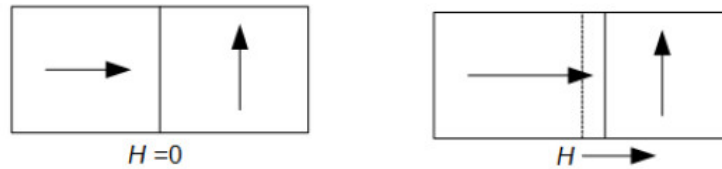


Figura 3.9: Deslocamento lateral das paredes dos domínios devido a um campo magnético externo (Heck, 1974).

Segundo Heck (1974), o processo de magnetização de um grupo de domínios pode ser composto por três etapas:

- Etapa inicial: deslocamento reversível dos limites (Figura 3.10b);
- Etapa intermédia: deslocamento irreversível dos limites (Figura 3.10c);
- Etapa superior: rotação reversível (Figura 3.10d).

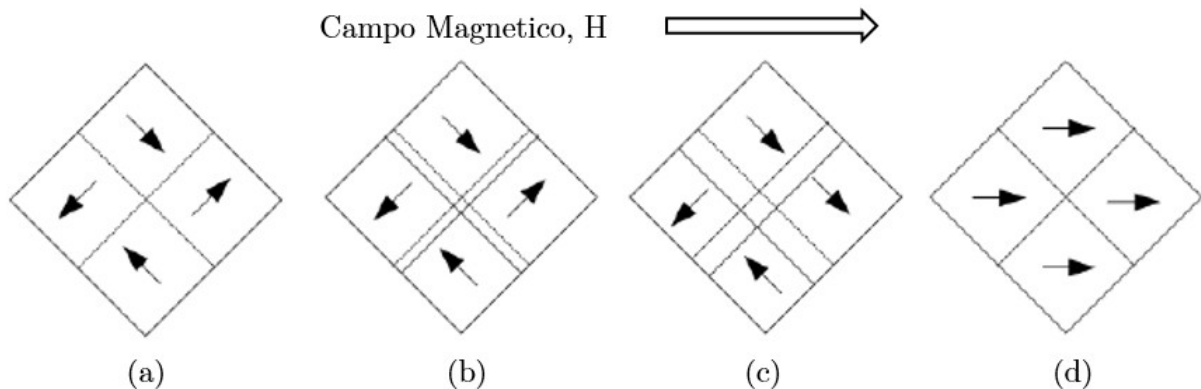


Figura 3.10: Etapas da magnetização de um corpo, desde (a) a magnetização nula pela ausência de campo magnético até (d) à saturação. (Heck, 1974).

Acrescentam-se ainda as alterações da estrutura dos domínios num ciclo de magnetização num corpo ferromagnético na Figura 3.11.

Weiss supunha ainda que estariam presentes forças inter-atômicas de grande magnitude que contribuíam para o efeito alinhador do campo aplicado. A existência de tais forças não era conhecida quando Weiss postulou esta teoria mas, em 1928, Werner Heisenberg apresentou uma teoria quântica que mencionava forças de intercâmbio entre elétrons de átomos adjacentes, confirmando as forças sugeridas por Weiss (Bardell and Moro, 1970).

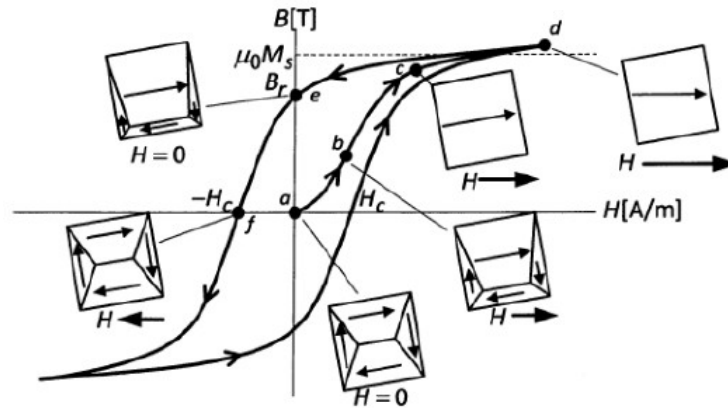


Figura 3.11: Alterações das estruturas dos domínios no processo de magnetização de um corpo ferromagnético (Somkun, 2010).

3.2.2 AÇOS ELÉTRICOS PARA NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES

A permeabilidade, as perdas por histerese e as perdas por correntes de Foucault são, normalmente, as propriedades magnéticas mais importantes dos aços elétricos. Contudo, em algumas aplicações, a magnetostricção, a coercividade, a remanescência e a anisotropia também podem ser importantes. Estas propriedades dependem da estrutura cristalina do material e, por isso, são afetadas por vários fatores, tais como, as características do grão, a quantidade de impurezas, a deformação a que está submetido, etc. A saturação magnética e a resistividade são outras propriedades que só dependem da composição química e da temperatura do material (Moses, 1990).

Processos de Fabrico e Composição Química

Os primeiros transformadores fabricados no final do século XIX tinham núcleos em ferro fundido forjado ou ferro sueco (Healthcote, 1996). Em 1933, Norman Goss descobriu que laminando ligas Fe-Si a frio com recozimentos intercalados, juntamente com um recozimento final a uma temperatura elevada, se produzia uma chapa com propriedades magnéticas muito melhores na direção da laminagem do que as da chapa laminada a quente. Isto justifica-se com a textura magneticamente favorável produzida pela recristalização secundária durante o recozimento a alta temperatura. A produção comercial de chapa de grão orientado iniciou-se por volta de 1945 e as suas propriedades têm vindo a ser continuamente melhoradas. Materiais com perdas de 1 W/kg (com $B_M = 1.7$ T e 0.23 mm de espessura) são vulgarmente produzidos para aplicações em núcleos de transformadores de grandes dimensões (Cullity and Graham, 2009).

Segundo Lemaître and Belgrand (2012), o processo de produção da chapa de aço elétrico de grão orientado para núcleos de transformadores é composto pelas seguintes etapas:

1. Produção de gusa recorrendo a um alto forno;
2. Dessulfurização para redução do teor de enxofre, adicionando carboneto de cálcio CaC_2 e magnésio (Mg);

3. Processo de Linz-Donawitz para redução do teor de carbono (C), silício (Si), manganês (Mn) e fósforo (P); são adicionados oxigênio (O₂) e limalhas de ferro;
4. Dessulfurização por adição de argon;
5. Desgaseificação por vácuo, para redução do teor de carbono (C) e oxigênio (O);
6. Fundição para a produção de lingotes;
7. Sucessivas laminagens a quente dos lingotes até à obtenção de chapa com 2 mm de espessura;
8. Recozimento;
9. Sucessivas laminagens a frio;
10. Reparações;
11. Descarbonização e aplicação de revestimento de óxido de magnésio (MgO);
12. Recozimento que segundo Dasgupta (2009) deve ser feito a uma temperatura da ordem dos 800 a 900°C para uniformizar o grão na direção da laminagem;
13. Aplainamento a quente e revestimento final.

O tamanho de grão tem um efeito muito forte nas perdas magnéticas. Com o seu aumento, as perdas por histerese diminuem. É referido pela AK Steel (2017) que os aços elétricos de grão orientado produzidos pela AK Steel são submetidos a uma recristalização secundária durante o último recozimento que provoca o crescimento de alguns grãos e diminuição de outros menores. Depois deste processo, os grãos são de tal forma grandes que se conseguem ver a olho nu mas, perderam a forma alongada na direção da laminagem. A orientação final dos grãos pode ser representada por um cubo com quatro arestas paralelas à direção da laminagem e as oito restantes a 45 graus da superfície da chapa (Figura 3.12). Como os grãos são mais facilmente magnetizados numa direção paralela às arestas do cubo, as propriedades magnéticas são mais facilmente magnetizadas na direção da laminagem.

Outro dos fatores que tem uma grande influência nas características magnéticas dos aços elétricos é o teor das substâncias que o constituem, sendo que as mais utilizadas atualmente são:

- Silício: aumenta a permeabilidade e a resistividade elétrica, diminuindo as perdas por histerese, as correntes de Foucault (Healthcote, 1996), a anisotropia e a magnetostrição. Como desvantagens, diminui a magnetização de saturação e diminui a ductilidade da liga, o que dificulta o processo de laminagem da chapa. O teor não deve ser inferior a 2.2% nem superior a 3.4% (Moses, 1990);
- Níquel: torna a liga menos quebradiça, o que facilita o processo de laminagem. A permeabilidade das ligas de Fe-Ni pode ser aumentada fazendo um recozimento na presença de um campo magnético, que provoca o ordenamento direcional dos

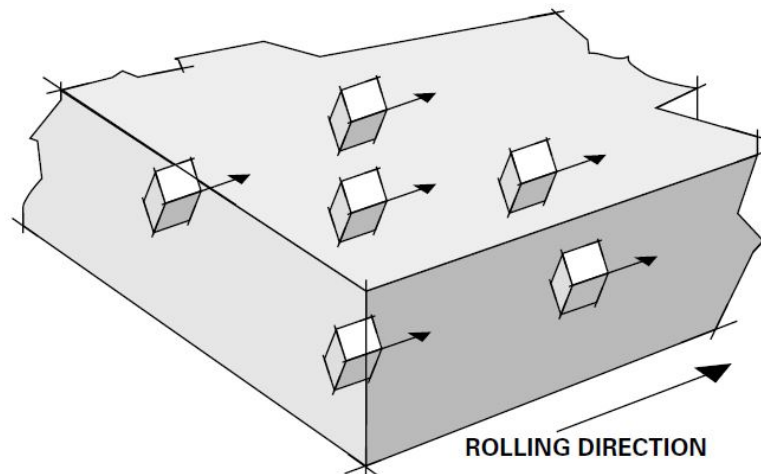


Figura 3.12: Esquema da estrutura cristalina dos aços elétricos de grão orientado (AK Steel, 2017).

seus átomos. As ligas submetidas a este processo designam-se por Permalloy e possuem uma elevada permeabilidade magnética e baixa histerese. No entanto, possuem uma indução de saturação relativamente baixa e um custo relativamente alto;

- Molibdénio: aumenta a resistividade elétrica e permite obter ciclos histeréticos mais estreitos sem diminuir muito a magnetização de saturação;
- Crómio: aumenta a resistividade elétrica e a permeabilidade magnética;
- Cobalto: contribui para que o material apresente, para campos magnéticos fracos, uma permeabilidade praticamente constante e perdas por histerese baixas. Aumenta a saturação de magnetização e a permeabilidade, possibilitando que o material tenha um melhor desempenho em aplicações com altas induções magnéticas; tem um custo relativamente elevado e a sua resistividade é baixa;
- Alumínio: diminui a coercividade magnética, as perdas por histerese e a magnetização de saturação (Pinho, 2009).

Foi proposto por Pry and Bean (1958) que a magnitude das perdas por correntes parasitas (Foucault) seria proporcional à distância entre paredes dos domínios e à espessura da chapa e, por esse motivo, a divisão dos domínios em subdomínios diminuiria as perdas totais no núcleo do transformador. Para isso, submetem-se chapas de alta permeabilidade à aplicação de um revestimento durante o arrefecimento do material, de modo a aplicar uma tensão mecânica que impeça a expansão e deformando a chapa, tal que diminua o tamanho dos domínios. Outro método é a aplicação de pequenos cortes pouco profundos na chapa, de modo mecânico ou a laser, na direção perpendicular à magnetização, para dividir os domínios. Esta divisão é dependente do valor da força com que o corte é aplicado, embora um valor excessivo de força localizada crie zonas de concentração de fluxo magnético e, conseqüentemente, maiores perdas.

Outros materiais com presença recente no desenvolvimento de núcleos magnéticos são os aços amorfos. Tal como o nome indica, possuem uma estrutura atômica não cris-

talina, pelos que os átomos que a constituem estão aleatoriamente distribuídos pelo material. Isto é conseguido através do arrefecimento rápido da liga em estado líquido, não permitindo que ocorra o ordenamento da estrutura cristalina. Apesar deste tipo de material apresentar uma potência de perdas baixíssima, a necessidade de incluir elementos não magnéticos na sua constituição faz com que o material tenha menor permeabilidade magnética e que possua um valor de indução magnética de saturação inferior às chapas de grãos orientados. Isso exige o emprego de maior quantidade de aço amorfo num núcleo para igualar os valores de saturação de indução magnética de outros transformadores. Com o desenvolvimento deste tipo de aços, os transformadores com núcleo deste material têm-se tornado sérios concorrentes aos transformadores com núcleo de aço de grãos orientados, como se pode observar no estudo de Inagaki et al. (2011), ainda que, para já, só para transformadores de distribuição.

Ainda outra via para a otimização do rendimento magnético da liga de aço-silício é a produção de aço microcristalino. No seu processo de fabrico passa por um arrefecimento rápido, semelhante ao dos aços amorfos, mas com composição totalmente metálica e estrutura cristalina, o que permite aproximar as suas propriedades magnéticas das dos aços não amorfos. Contém ainda maior concentração de silício e alumínio que as chapas magnéticas comuns (Healthcote, 1996).

Perdas

O propósito do núcleo do transformador é garantir uma passagem com baixa relutância do fluxo magnético entre os enrolamentos. Ao fazê-lo, verificam-se perdas por histerese e por correntes de Foucault, que provocam o aquecimento do núcleo e ruído.

As perdas por histerese podem ser minimizadas utilizando materiais com boa permeabilidade para que os ciclos de histerese sejam reduzidos (Healthcote, 1996) e com poucas impurezas. O tamanho, a forma e a distribuição das impurezas afetam as perdas por histerese, sendo que, geralmente, o diâmetro das impurezas com mais impacto varia entre 0.1 e 1 nm. Em aços de grão orientado, as perdas são proporcionais ao espaçamento entre as paredes dos domínios e inversamente proporcionais à espessura da chapa. O espaçamento entre as paredes dos domínios depende de vários fatores, tais como, a textura, as características da superfície, a frequência do magnetismo e a indução de pico (Moses, 1990).

As correntes de Foucault, também conhecidas por “correntes de turbilhão” (em inglês, *eddy currents*), circulam num plano perpendicular às linhas de fluxo. Desta forma, e devido ao seu sentido de circulação e de acordo com a lei de Lenz, o fluxo produzido por estas correntes opõe-se ao fluxo indutor (Pinho, 2009). Perdas causadas por este tipo de correntes podem ser reduzidas construindo o núcleo a partir de um empilhamento de chapas laminadas de baixa espessura (Healthcote, 1996); entre os 0.18 e os 0.35 mm, segundo Dasgupta (2009), e com um elevado grau de orientação do grão (Moses, 1990) e aumento da resistividade do material (Healthcote, 1996).

3.2.3 TIPOS DE CHAPA UTILIZADOS PELA EFACEC

Os transformadores fabricados pela EFACEC são concebidos tendo em conta o balanço entre o custo inicial e as perdas ao longo do período de vida útil. Para isso, é necessário ter-se à disposição uma gama de materiais que permita fabricar transformadores para todas as necessidades. Um dos fabricantes de chapa escolhido pela EFACEC para seu fornecedor é a empresa Thyssenkrupp que tem duas gamas de aços elétricos de grão orientado para transformadores: *PowerCore C* e *PowerCore H*. Os da gama *PowerCore C* são mais convencionais e, por isso, têm espessuras mais elevadas e propriedades inferiores aos da *PowerCore H*, que têm uma textura cristalográfica mais nítida e um revestimento isolante que melhora a estrutura do domínio magnético, proporcionando perdas e níveis de ruído inferiores.

Os tipos de chapa utilizados pela EFACEC e as respectivas propriedades encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.3. Na primeira coluna da Tabela encontram-se as designações internas da Thyssenkrupp. Essa designação é composta por uma letra seguida por dois conjuntos de números e por vezes uma letra. A letra que surge no início indica a gama da chapa, o primeiro dos conjuntos de números indica as perdas da chapa garantidas a 50 Hz, o segundo conjunto indica a espessura nominal em milímetros multiplicada por 100 e a letra final L indica que o domínio magnético da chapa foi refinado por *laser scribing*. Na segunda coluna estão as designações segundo a norma EN10027-1 (2005), apresentada na Tabela 3.2, e nas colunas seguintes a espessura, as perdas típicas e garantidas em vários cenários de frequência e de fluxo magnético e a polarização típica e garantida a 800 A/m.

Na Tabela 3.3 estão indicadas as propriedades físicas que são comuns a todos os aços da Thyssenkrupp utilizados pela EFACEC.

Tabela 3.1: Tipos de chapa utilizados pela EFACEC (ThyssenKrupp Electrical Steel, 2015).

Designação		Espessura /mm	Perdas típicas /W·kg ⁻¹				Perdas garantidas /W·kg ⁻¹		Polarização a 800 A·m ⁻¹	
Thyssenkrupp PowerCore	Standard		50Hz		60Hz		50Hz	60Hz	Típica	Garantida
			1.5 T	1.7 T	1.5 T	1.7 T				
H 075-23 L	M 75-23 P5	0.23	0.55	0.74	0.73	0.97	0.75	0.99	1.91	1.88
H 080-23 L	M 80-23 P5	0.23	0.57	0.78	0.75	1.04	0.80	1.06	1.91	1.88
H 085-23 L	M 85-23 P5	0.23	0.60	0.83	0.79	1.10	0.85	1.12	1.90	1.88
H 085-27 L	M 85-27 P5	0.27	0.63	0.83	0.84	1.10	0.85	1.12	1.91	1.88
H 090-27 L	M 90-27 P5	0.27	0.65	0.88	0.86	1.17	0.90	1.19	1.91	1.88
H 105 - 30	M 105-30 P5	0.30	0.75	1.03	0.99	1.37	1.05	1.39	1.91	1.88
C 130 - 30	M 140-30 S5	0.30	0.84	1.23	1.10	1.63	1.30	1.72	1.83	1.80
C 150 - 30	M 150-30 S	0.30	0.93	1.43	1.23	1.87	1.50	1.96	1.78	1.75

Tabela 3.2: Designação dos aços elétricos segundo a Norma EN 10027-1:2005 (EN10027-1, 2005).

Principal symbols		Additional symbols	
M	n n n n n - n n	a	
Principal symbols			
Letter	Property	Type of product	Additional symbols
M = electrical steel	nnn(n) = max specified loss in W/kg x 100 nn = 100 x nominal thickness in mm A hyphen shall separate the two properties	For magnetic polarization at 50Hz of 1,5 Tesla: A = non-oriented D = non-alloy semi-finished (not finally annealed) E = alloy semi-finished (not finally annealed) For magnetic polarization at 50Hz of 1,7 Tesla: P = high permeability grain oriented S = conventional grain oriented	-
^a n = numerical characters, a = alpha characters, an = alphanumeric characters.			

Tabela 3.3: Propriedades físicas típicas dos aços utilizados pela EFACEC (ThyssenKrupp Electrical Steel, 2015).

Polarização de Saturação, J_s	2.03 T
Intensidade do campo coercivo, H_c	5 A/m
Temperatura de Curie, T_c	745 °C
Massa volúmica, ρ	7.65 kg/dm ³
Resistividade elétrica p_e	0.48 $\mu\Omega \cdot m$
Tensão de rotura à tração, R_m :	
– direção paralela à laminagem	330 - 370 MPa
– direção transversa à laminagem	390 - 420 MPa
Tensão de cedência à tração, R_p :	
– direção paralela à laminagem	300 - 340 MPa
– direção transversa à laminagem	330 - 360 MPa
Alongamento A_l :	
– direção paralela à laminagem	6 - 14 %
– direção transversa à laminagem	24 - 48 %
Dureza:	
– HRB 15T	75 - 85
– HV5	170 - 180
Fator de empilhamento, espessura:	
– 0.23 mm	95.5 %
– 0.27 mm	96.0 %
– 0.30 mm	96.5 %
– 0.35 mm	97.0 %

3.3 MAGNETOSTRIÇÃO

Joule descobriu a magnetostricção do ferro em 1842. Desde aí, muitos fenómenos relacionados com a magnetoelasticidade do ferro e das suas ligas têm sido descobertos e estudados (Belahcen, 2004).

A influência mútua das propriedades magnéticas e elásticas dos materiais é designada por magnetoelasticidade. Está relacionada com o facto de a maior parte das interações entre os momentos atómicos em sólidos dependerem da distância entre eles. O efeito magnetoelástico ou magnetostricção é a relação entre parâmetros físicos de uma amostra e o seu estado magnético. As propriedades magnéticas do material — a magnetização, a energia de anisotropia magnética e a temperatura de ordenamento magnético — são afetadas não só pelas solicitações mecânicas externas, mas também pelas tensões mecânicas internas (Clark, 1980).

A magnetostricção provoca a deformação do material devido a interações magnéticas e pode ser classificada como espontânea ou forçada. A magnetostricção espontânea é devida à interação magnética interna no material e a forçada é devida a uma interação magnética entre a amostra e um campo magnético aplicado externamente. Pode surgir magnetostricção de volume se a magnetização de saturação M_s for alterada por campos magnéticos fortes ou o material for exposto a temperaturas próximas das de transição de fase magnética, tais como, a temperatura de Curie no caso dos materiais ferromagnéticos (Fujita and Fukamichi, 1999).

Se um campo magnético for aplicado a um provete, verifica-se uma deformação anisotrópica suplementar que o alonga ou comprime. O fenómeno que depende do campo magnético é conhecido como magnetostricção de Joule. A ele está associada outra deformação, designada por magnetostricção transversa que pode ser detetada na direção ortogonal ao campo, com sinal oposto e metade da amplitude. Na presença de campos magnéticos reduzidos, a magnetostricção de Joule e a transversa não fazem variar o volume do provete. Contudo, na presença de campos elevados, pode verificar-se uma pequena variação de volume.

A magnetostricção dos materiais depende não só dos campos magnéticos, mas também das tensões mecânicas neles aplicadas. Materiais com magnetostricção positiva, quando submetidos a um campo magnético, alongam e a sua magnetização aumenta com esforços de tração, enquanto que materiais com magnetostricção negativa contraem e a sua magnetização diminui com esforços de tração. O ferro e as suas ligas apresentam magnetostricção positiva e negativa, dependendo da intensidade do campo magnético aplicado (Belahcen, 2004).

A magnetostricção causa nos transformadores e nas máquinas rotativas ruído e vibrações, que resultam não só em poluição sonora, mas também em perdas de potência e maior desgaste (Hasenzagl et al., 1996).

3.3.1 RUÍDO

A principal fonte de ruído acústico num transformador, como já foi referido, é consequente de vibrações provocadas pelo efeito da magnetostricção da chapa que constitui o seu núcleo. Esse ruído possui frequências definidas, pares e múltiplas da frequência de alimentação (para uma alimentação de frequência 50 Hz, registam se valores de 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, etc). Tendo em conta que a gama habitual de frequências audíveis de uma pessoa saudável engloba valores que vão dos 20 Hz aos 20 kHz, os componentes tonais do ruído do transformador, que são maioritariamente de baixa frequência, estão contidos precisamente neste intervalo. Por este motivo, o ruído emitido por um transformador é uma fonte de incómodo e intrusão, provocando queixas por parte de quem trabalha ou vive em seu redor.

Também, neste contexto, deve assegurar-se que as frequências de ressonância do núcleo (e das restantes peças) não coincidam com a frequência de excitação elétrica ou com as frequências do ruído, para que não haja ressonância e amplificação do ruído. As vibrações do núcleo, quando transmitidas pelo ar, óleo ou estrutura, podem também induzir ressonâncias noutros componentes que não sejam fontes diretas de ruído. Estas amplificações devem ser eliminadas na fase do projeto ou deve criar-se uma supressão de vibração de modo a controlar a sua amplitude (Masti et al., 2004).

Deve ainda referir-se que a presença de harmónicos na rede onde se integra o transformador aumenta o nível sonoro do ruído produzido por ele, visto que há um aumento do número de componentes de forças magnéticas (oriundas dos harmónicos da corrente do circuito AT ou BT) e, conseqüentemente, um aumento da probabilidade de excitação de vibrações ressonantes nas partes estruturais do transformador (núcleo, enrolamentos, tanque, etc.) e de excitação de ressonâncias acústicas. Neste contexto, e através do estudo de Ertl and Voss (2014), conclui-se que os harmónicos da corrente da carga de maior ordem têm uma maior contribuição no aumento do ruído à carga total do que harmónicos de menor ordem. Também a presença da componente de corrente contínua na alimentação do transformador provoca um aumento do ruído e da área do ciclo de histerese e a perda da sua simetria, segundo Inoue and Okabe (2014).

Apesar de não ser ideal por aumentar os custos do material e o tamanho do transformador, uma forma de reduzir os níveis ruído seria diminuir a densidade de pico de fluxo de funcionamento no núcleo (Kulkarni and Khaparde, 2004). Outras soluções com uma melhor relação custo-benefício consistem em reforçar as bandas e os suportes e colocar amortecedores entre algumas peças do transformador (George, 1931). Painéis e invólucros insonorizadores também são frequentemente utilizados (Murray, 1949). A colocação do transformador num compartimento fechado com paredes grossas e compactas é uma opção fácil, mas dispendiosa (Kulkarni and Khaparde, 2004).

Outra técnica para redução de ruído é o controlo ativo de ruído e consiste na geração de um ruído anti-fase e sobreposto ao do transformador. Requer instrumentação muito sofisticada e instalações computacionais. Teoh et al. (1998) reportam que é possível obter-se uma redução de ruído de 5 a 15 dB, dependendo da eficácia da implementação da técnica.

Kulkarni and Khaparde (2004) sumarizaram as técnicas de redução de ruído nas vertentes apresentadas no que se segue:

- Reduzir a densidade de fluxo do núcleo: proporciona uma redução de ruído de 3 a 5 dB para uma redução na densidade de fluxo de 10 % (ou aproximadamente 2 dB por redução da densidade de fluxo de 0.1 T); o método tem efeitos adversos sobre o custo e o tamanho dos transformadores;
- Utilizar materiais da classe Hi-B e riscados proporcionam uma redução de 2 a 3 dB em comparação com os das classes não Hi-B;
- Evitar a ressonância do núcleo através do cálculo das frequências de ressonância do mesmo; as frequências de ressonância do núcleo não devem coincidir com as frequências de excitação;
- Aumentar o amortecimento do núcleo através da aplicação de revestimento viscoelástico ou adesivo adequado às chapas;
- Garantir que todas as ligações ou anexos ao núcleo são flexíveis para que não transmitam vibrações.
- Fazer juntas de *step-lap*: permite uma redução de cerca de 4 a 5 dB em comparação com a construção convencional para as densidades de fluxo vulgarmente utilizadas (1.6 a 1.7 T);
- Eliminar as saliências das extremidades do núcleo construído, porque geralmente não contribuem para a condução do fluxo magnético e podem aumentar o ruído devido a vibrações;
- Distribuir adequadamente a pressão de aperto no núcleo de modo a que nenhum comprimento relevante do núcleo fique livre; se as colunas e as culassas forem presas com resina de vidro ou fitas de fibra de vidro, o passo (distância entre duas fitas) deve ser pequeno para que seja aplicada uma pressão uniforme adequada;
- Usar painéis de isolamento acústico entre os reforços dos tanques pode originar uma redução de 5 a 15 dB;
- Aumentar a massa da parede do tanque através do uso de areia em cavidades ocas na parede pode provocar uma redução apreciável do nível de ruído;
- Utilizar tanques duplos: tanques internos e externos adequadamente isolados uns dos outros para eliminar as vibrações estruturais; além disso, lã absorvente adequada pode ser colocada entre os dois tanques; a redução de ruído é de cerca de 15 dB;
- Colocar o transformador em caixotes de betão ou tijolo; é um processo bastante caro mas a redução de ruído é de cerca de 20 a 30 dB;
- Usar a técnica de cancelamento de fase ativa: o som emitido por um transformador é sobreposto por som anti-fase aplicado externamente; uma redução do nível de ruído de 5 a 15 dB pode ser possível;

- Se o nível de ruído do transformador exigido for muito baixo, para se ter um ventilador com um nível de ruído mais baixo o arrefecimento, ONAN (OA) pode ser usado em vez do misto ONAN/ONAF (FA) para transformadores classificados como pequenos ou médios. ¹

São ainda enumeradas por Kulkarni and Khaparde (2004) algumas precauções que tem de ser tomadas no local para minimizar o nível de ruído:

- As superfícies refletoras não devem coincidir com metade do comprimento de onda das frequências de ruído emitidas pelo transformador para evitar ondas estacionárias e reverberações/ecos;
- Aplicar um material absorvente de som, adequado para utilização no exterior, nas paredes de incêndio caso estejam adjacentes ao transformador para que não ocorram reflexos indesejáveis;
- Os transformadores de distribuição do tipo seco estão quase sempre numa sala dentro de um edifício; tendo as paredes da sala um baixo coeficiente de absorção acústica, o som emitido pelo transformador é refletido de parede para parede; isto pode conduzir a um aumento considerável do nível de ruído; estes aspetos devem ser devidamente considerados pelos utilizadores (ao projetar a sala) e pelos fabricantes (ao projetar o transformador);
- As paredes de barreira simples para obstruir o ruído não são eficazes nas arestas e, por isso, devem ser prolongadas em ângulos adequados numa ou em ambas as extremidades com uma aplicação de material absorvente de som para que sejam obtidos melhores resultados;
- O transformador não deve ser fixado a uma fundação na qual as paredes adjacentes também sejam suportadas porque as vibrações do transformador podem-se transmitir através da fundação para as paredes; a vibração destas paredes irá aumentar o nível de ruído geral;
- Deve evitar-se uma ligação sólida entre um transformador vibratório e qualquer estrutura sólida na vizinhança (devem ser utilizadas ligações flexíveis na medida do possível);
- A base do tanque pode ser isolada da base de suporte / fundação por um amortecedor de vibração adequado para reduzir as vibrações suportadas pela estrutura.

¹Significados das letras das abreviaturas ONAN e ONAF segundo Dickinson (2010):

O: Óleo mineral ou fluido de isolamento sintético com um ponto de combustão ≤ 300 °C;

N: Fluxo de convecção natural através de equipamentos de refrigeração e em enrolamentos;

A: Ar;

N: Convecção natural;

F: Circulação forçada através de ventoinhas (refrigeração a ar) ou bombas (refrigeração a água).

3.3.2 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO

A norma IEC60076-10-1 (2016) descreve os procedimentos de teste e de avaliação dos níveis de ruído para transformadores de potência. Existem basicamente dois métodos de medição de ruído: medição da pressão sonora e medição da intensidade do som.

O nível de ruído é medido nos transformadores de potência nos seguintes estados de funcionamento:

- Sem carga e sem o(s) dispositivo(s) de refrigeração em funcionamento;
- Sem carga e com o(s) dispositivo(s) de refrigeração em funcionamento;
- Com carga em curto circuito e sem o(s) dispositivo(s) de refrigeração em funcionamento;
- Com carga em curto circuito e com o(s) dispositivo(s) de refrigeração em funcionamento;
- Apenas com o(s) dispositivo(s) de refrigeração em funcionamento.

Método da pressão sonora

O nível de pressão sonora é uma quantidade escalar e requer instrumentação simples. A sua medição é, no entanto, afetada pelo ambiente de teste e, por isso, têm que ser feitas duas correções: uma relativa ao ruído de fundo e outra às reflexões do som nas paredes da sala e/ou objeto refletores dentro da área de teste.

Método da intensidade sonora

A intensidade sonora é uma quantidade vetorial e o método mede o som direcional. Por conseguinte, é menos afetada por um ruído de fundo. Assim, o método de intensidade de som pode dar medições mais precisas na presença de ruído de fundo. No entanto, as medições de intensidade sonora exigem maior habilidade e instrumentação mais sofisticada. Informações sobre a localização e as características das fontes de ruído podem ser obtidas através do estudo do espectro de frequência.

3.3.3 AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE RUÍDO

A emissão de ruído de transformadores e outras máquinas é normalmente avaliada através da ponderação A do nível de pressão sonora especificado na norma IEC 61721-1.

O filtro acústico de ponderação A é vulgarmente utilizado para dar ênfase às frequências às quais o ouvido humano é mais sensível (entre 1 e 6 kHz) e atenuar as frequências muito altas e muito baixas impercetíveis pelo ouvido humano.

Consequentemente, a componente fundamental da magnetostrição (100Hz para magnetizações a 50 Hz) é muito menos importante para o nível de ruído acústico do que as

maiores. Por isso, as características de ponderação A da magnetostrição, tais como os níveis de velocidade e aceleração ponderados, são necessárias para avaliação do ruído acústico de chapa de aço elétrico

O nível de velocidade de ponderação A da magnetostrição corresponde a um nível de pressão sonora numa superfície em vibração devido a magnetostrição provocada por uma polarização magnética sinusoidal. O nível de aceleração de ponderação A da magnetostrição descreve a aceleração característica da magnetostrição do material sujeito a uma polarização magnética sinusoidal.

Os harmónicos dos sinais de magnetostrição medidos podem ser obtidos através de uma análise FFT aos mesmos (IEC TR 62581, 2010).

Determinação dos níveis de velocidade e de aceleração de ponderação A da magnetostrição

Esta quantidade apenas pode ser obtida indiretamente do sinal medido de magnetostrição, fazendo uma análise FFT para obtenção dos harmónicos do sinal. O nível de velocidade de ponderação A da magnetostrição L_{vA} é definido por

$$L_{vA} = 20 \log_{10} \frac{\rho_{atm} c \sqrt{\sum_i [(2\pi f_i) (\lambda_i / \sqrt{2}) \alpha_i]^2}}{P_{e0}}, \quad (3.1)$$

em que ρ é a massa volúmica da atmosfera, c é a velocidade do som, f_i é a frequência da componente harmónica da magnetostrição i , λ_i é a magnitude da componente harmónica da magnetostrição i , α_i é o coeficiente de ponderação A na frequência f_i e $P_{e0} = 2 \times 10^{-5}$ Pa e é a mínima pressão sonora audível.

A frequência da componente harmónica da magnetostrição i , f_i é calculada pela equação

$$f_i = 2 \cdot \pi \cdot f_0, \quad (3.2)$$

em que f_0 a frequência da polarização magnética.

A equação para determinação do coeficiente de ponderação A é

$$\alpha_i = 10^{\frac{A(f)}{20}}, \quad (3.3)$$

em que o fator de ponderação A é determinado através da equação

$$A(f) = 20 \log_{10}(R_A(f)) + 2, \quad (3.4)$$

e a respetiva equação subjacente é

$$R_A(f) = \frac{12194^2 \cdot f^4}{(f + 20.6^2) \cdot \sqrt{(f^2 + 158.5^2)(f^2 + 737.9^2)} \cdot (f^2 + 12194^2)}. \quad (3.5)$$

O nível de aceleração de ponderação A(f) da magnetostrição L_{aA} é definido por

$$L_{aA} = 20 \log_{10} \frac{\sqrt{\sum_i [(2\pi f_i)^2 (\lambda_i / \sqrt{2}) \alpha_i]^2}}{a_0}, \quad (3.6)$$

em que $a_0 = 2.79 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2/\text{m}$ e é o valor de referência para a aceleração por metro de comprimento da amostra.

3.4 INFLUÊNCIA DE PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO E CORTE DA CHAPA MAGNÉTICA NA MAGNETOSTRIÇÃO

Para cortar um aço elétrico é importante escolher um método que tenha um impacto reduzido nas propriedades magnéticas. O corte mecânico por guilhotina ou puncionamento e o corte por laser criam tensões/deformações na zona da aresta de corte que influenciam o comportamento de magnetização e as perdas do material (Schoppa et al., 2003). Gong et al. (2015) concluiu que as perdas de potência no aço elétrico estão fortemente relacionadas com a magnetostrição sob tensões de compressão. Para uma tensão de compressão de 20 MPa, as perdas de potência a 1.5, 1.7 e 1.9 T aumentam em 167%, 147% e 84% em relação à situação de inexistência de tensão, respetivamente.

Dos vários métodos de corte, o corte mecânico por guilhotina ou puncionamento é o mais utilizado. Segundo Matheisel (1973), a área deformada plasticamente pelas lâminas pode chegar a 0.1 mm da aresta de corte. As lâminas da guilhotina devem estar afiadas de modo a diminuir as rebarbas nos limites das chapas, causadas pelo seu corte, que podem causar um aumento considerável nas perdas no núcleo, visto que podem perfurar o isolamento entre chapas consecutivas, estabelecendo contacto elétrico e criando caminhos para correntes parasitas. A norma BS 601 define os limites admissíveis para estas rebarbas. Até ao final da década de 80, normalmente as rebarbas tinham que ser removidas por esmerilhamento. Esse procedimento tendia a danificar o revestimento da chapa, o que implicava a uma aplicação de revestimento adicional, e a provocar um aumento do nível de tensões que teria que ser minimizado com um novo recozimento. Com a combinação de ferramentas de corte e de materiais atuais é possível executar-se a operação de corte com quantidades mínimas de rebarbas. A altura das rebarbas obtidas nos anos 70 com as ferramentas de corte e os materiais da época chegava a ultrapassar em 0.05 mm a estipulada como máxima pela norma BS 601. Atualmente é possível obter-se rebarbas com menos de 0.02 mm, o que permite dispensar a realização do esmerilhamento, da reaplicação do revestimento e do recozimento (Healthcote, 1996).

Em aplicações onde o material é propositadamente conformado ou cortado em peças pequenas, um recozimento de amaciamento pode ser necessário para melhorar a planeza da chapa e atenuar as tensões das arestas (Moses, 1990).

Schoppa et al. (2003) fez um estudo que lhe permitiu concluir que atualmente o corte por jato de água é o método que menos deteriora as propriedades magnéticas das extremidades da chapa devido ao efeito de arrefecimento proporcionado pela água durante o corte. Contudo, o facto de a velocidade de corte ser muito baixa comparativamente com os métodos comuns só o torna adequado à produção de protótipos e pequenas séries.

3.5 MODELOS CONSTITUTIVOS DA MAGNETOSTRIÇÃO

3.5.1 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS DA MAGNETOSTRIÇÃO

Os materiais magnéticos são caracterizados pela histerese entre a indução magnética B e intensidade do campo magnético H e pela histerese mecânica entre a deformação mecânica S e a indução magnética B (kaltenbacher et al., 2013). Na Figura 3.13 estão representadas as histereses magnética e mecânica e os seus comportamentos não-lineares.

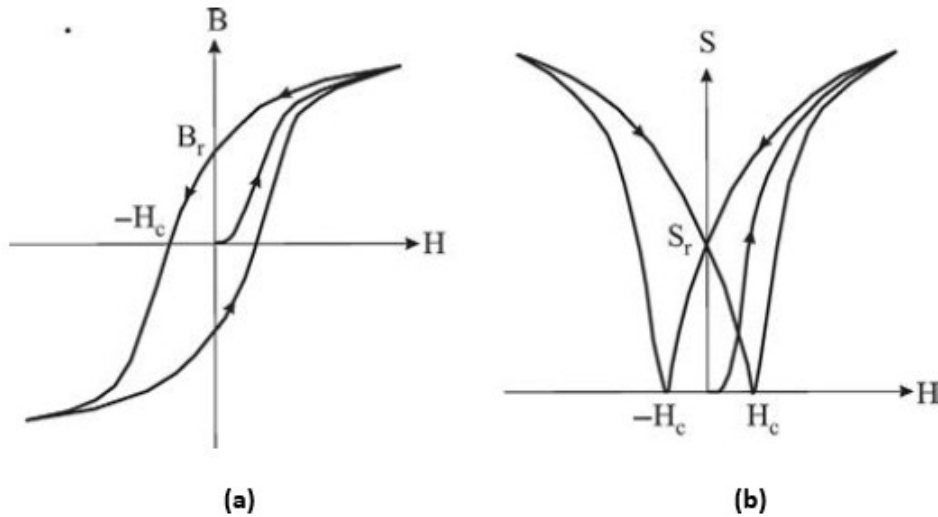


Figura 3.13: Histereses magnética (a) e mecânica (b) (kaltenbacher et al., 2013).

Nos materiais ferromagnéticos a magnetostricção é provocada por uma combinação de tensões relacionadas com o comportamento mecânico e com a permeabilidade magnética. Esta combinação pode ser descrita, analiticamente, e de forma simplificada pelas equações constitutivas lineares

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}^H \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{H}, \quad (3.7)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\mu}^S \mathbf{H}, \quad (3.8)$$

em que $\boldsymbol{\sigma}$ é o vetor que representa as tensões mecânicas, \mathbf{c}^H é a matriz de rigidez, \mathbf{S} é o vetor de flexibilidade, \mathbf{e}^T é a matriz transposta de acoplamento piezomagnético e $\boldsymbol{\mu}^S$ é a matriz da permeabilidade magnética. Por conveniência, as equações 3.7 e 3.8 podem ser escritas tendo como variáveis independentes a tensão mecânica e a intensidade de campo magnético.

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^H \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d}^T \mathbf{H} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{d} \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\mu}^\sigma \mathbf{H} \quad (3.10)$$

Os parâmetros \mathbf{s}^H , \mathbf{d}^T e $\boldsymbol{\mu}^\sigma$ relacionam-se com os parâmetros anteriormente enunciados de acordo com as equações 3.11, 3.12 e 3.13.

$$\mathbf{s}^H = \mathbf{c}^{-H} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{d}^T = \mathbf{c}^H \mathbf{e}^T \quad (3.12)$$

$$\boldsymbol{\mu}^\sigma = \boldsymbol{\mu}^S + \mathbf{d}^T \mathbf{e} \quad (3.13)$$

3.5.2 MODELO BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL

A chapa magnética utilizada na concepção dos núcleos dos transformadores é geralmente obtida pelo processo de laminagem e é, por esse motivo, anisotrópica. No entanto, ela é geralmente cortada de forma a que o fluxo venha a ser conduzido na direção da laminagem.

De acordo com Somkun (2010) a mudança de fase entre as tensões magnéticas e a magnetostrrição em função de uma constante de tempo (τ) pode ser expressa por

$$\tau \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_r \\ \lambda_t \\ \gamma_{rt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_r \\ \lambda_t \\ \gamma_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{P_r} & -\frac{\xi_r}{P_t} & 0 \\ -\frac{\xi_t}{P_r} & \frac{1}{P_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} b_r^2 \\ b_t^2 \\ b_r b_t \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

em que λ_r é a magnetostrrição na direção da laminagem, λ_t é a magnetostrrição na direção transversal à da laminagem, γ_{rt} a deformação de corte entre a direção da laminagem e a direção transversal à da laminagem, P_r o módulo magnético na direção da laminagem, P_t o módulo magnético na direção transversal à da laminagem, ξ_r o coeficiente de Poisson magnético na direção da laminagem, ξ_t o coeficiente de Poisson magnético na direção transversal à da laminagem, G_{rt} o módulo magnético de corte, μ_0 é a permeabilidade magnética no vazio, b_r é a densidade de fluxo na direção da laminagem e b_t é a densidade de fluxo na direção transversal à laminagem.

Geralmente, quando as medições são pela técnica de extensometria, são dispostos três extensômetros sob a forma de uma roseta com um espaçamento entre eles de 45° e que medem as deformações ε_a , ε_b e ε_c (Figura 3.14). Transpondo as deformações obtidas nas medições para a direção de laminagem e para a transversal à mesma, temos

$$\begin{bmatrix} \lambda_r \\ \lambda_t \\ \gamma_{rt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \sin^2 \phi & \sin \phi \cos \phi \\ \cos^2(\phi+\alpha) & \sin^2(\phi+\alpha) & \sin(\phi+\alpha)\cos(\phi+\alpha) \\ \cos^2(\phi+\alpha+\beta) & \sin^2(\phi+\alpha+\beta) & \sin(\phi+\alpha+\beta)\cos(\phi+\alpha+\beta) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

em que ϕ é o ângulo entre a direção de laminagem e o primeiro extensômetro, α é o ângulo entre o primeiro e o segundo extensômetros e β é o ângulo entre o segundo e o terceiro extensômetros.

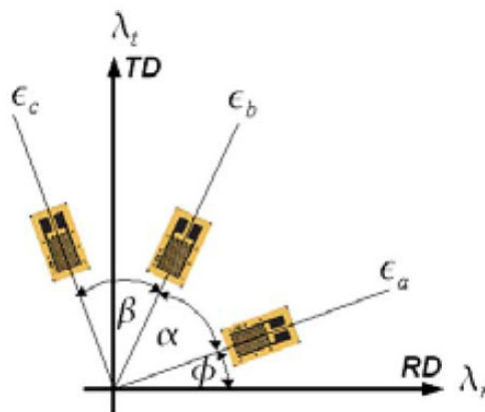


Figura 3.14: Histereses magnética (a) e mecânica (b) (kaltenbacher et al., 2013).

Se o alongamento e a contração λ_1 e λ_2 ocorrerem ao longo do eixo principal e a deformação de corte for igual a zero, temos

$$\lambda_1, \lambda_2 = \frac{\lambda_r + \lambda_t}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_r - \lambda_t}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{rt}}{2}\right)^2}. \quad (3.16)$$

O ângulo entre o eixo principal do sistema de medições e a direção de laminagem pode ser calculado através de

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{rt}}{\lambda_r - \lambda_t} \right). \quad (3.17)$$

3.6 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA MAGNETOSTRIÇÃO

A medição da magnetostricção consiste na medição das dimensões físicas de uma amostra sob magnetização. As maiores dificuldades neste processo são o facto de as variações das dimensões serem muito reduzidas ($\lambda_s = \delta l/l$ para as ligas SiFe é cerca de 10^{-5}) e a forte dependência das tensões mecânicas (Klimczyk et al., 2009). O provete deve ser relativamente longo para se obterem variações de dimensões suficientes e deve ser semelhante ao recomendado para utilização nos métodos de Epstein ou Single Sheet Tester. Como a magnetostricção depende da forma da onda do fluxo magnético, este parâmetro deve ser controlado (Anderson, 2008).

3.6.1 PONTE DE EPSTEIN

A *ponte de Epstein* é o instrumento mais vulgar para a determinação das propriedades magnéticas da chapa de aço elétrico. Está bem definida por normas de vários países e, por isso, garante um elevado grau de reprodutibilidade. Por este motivo, a relação entre os resultados obtidos neste tipo de ensaio para uma chapa de aço elétrico e o seu desempenho na máquina elétrica, também designada por fator de construção, é bem conhecida (Sievert, 1989).

Consiste num pequeno transformador monofásico constituído por enrolamentos primário e secundário, com o mesmo número de voltas e o mesmo diâmetro de fio, que se dividem em quatro bobinas cada um. Cada bobina secundária é colocada no interior de uma bobina primária, concetricamente, e são enroladas em torno de cada perna da ponte. Estas pernas são prismas retangulares ocas onde se inserem as amostras no seu interior que serão magneticamente induzidas pelas bobinas que as rodeiam (Figura 3.15). O sistema pode ser manipulado através dos terminais dos enrolamentos primário e secundário. Para que as chapas formem um circuito fechado, os braços da ponte estão dispostos sob a forma de um quadrado e as juntas entre chapas são da forma *double step-lap* (Figura 3.16).

Este sistema não possibilita a determinação dos valores locais da indução magnética e do campo magnético, apenas permite saber o valor médio da primeira e o valor máximo

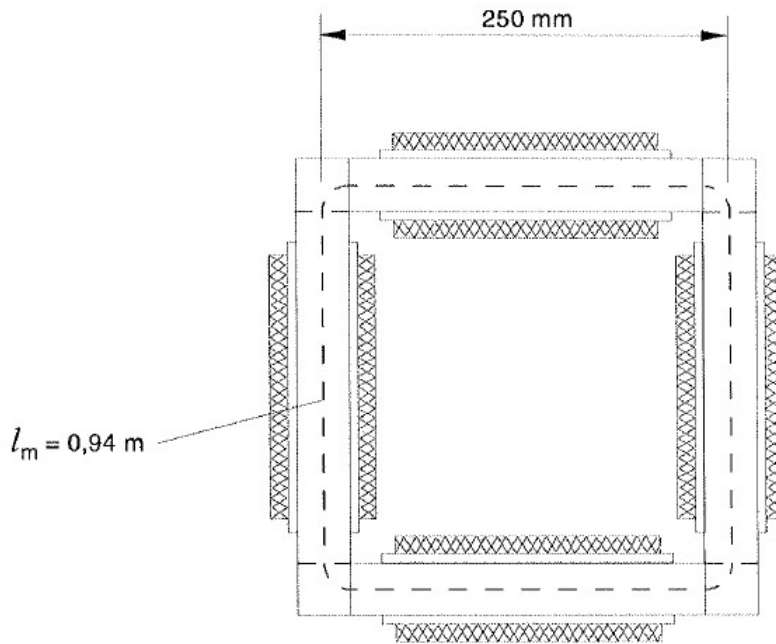


Figura 3.15: Esquema de montagem da ponte de Epstein (IEC60404-2, 2008).

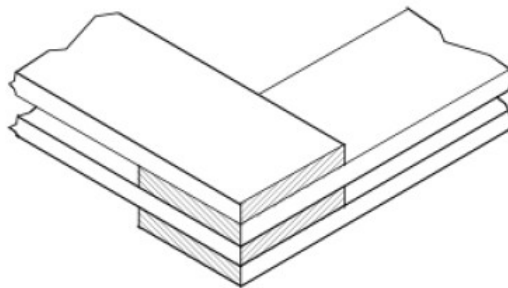


Figura 3.16: Junta double step-lap (IEC60404-2, 2008).

do segundo de toda a área da chapa e não tem em conta a anisotropia e a geometria das extremidades da chapa.

O valor máximo da indução magnética (B_M) que percorre a amostra calcula-se através da equação 3.18 (IEC TR 62581, 2010) e depende do valor médio da tensão retificada nos terminais do circuito secundário ($|\overline{V}_2|$), do valor da frequência da tensão (f), do número de espiras do enrolamento secundário (N_2) e da área da secção transversal da amostra (A).

$$|\overline{V}_2| = f \times N_2 \times A \times B_M \Leftrightarrow B_M = \frac{|\overline{V}_2|}{f \times N_2 \times A} \quad (3.18)$$

O valor da indução magnética resulta da soma do campo de indução magnética presente na amostra com o presente no ar que a circunda, pelo que, a partir do momento em que o valor da indução magnética ultrapassa o de saturação da amostra, $|\overline{V}_2|$ pasará a aumentar proporcionalmente ao campo magnético no ar, o que faz com que os

resultados da medição sejam menos exatos. Para minimizar este problema, podem ser incluídas bobinas de compensação da indução magnética no ar, que constituam um circuito primário e secundário de um pequeno transformador que, tal como as da ponte, sejam concêntricas e a secundária ocupe a posição interior. A bobina primária é ligada em série ao circuito primário da ponte e a secundária é ligada em série às restantes secundárias em oposição de fases, de modo a anular a força eletromotriz do circuito secundário da ponte induzido pela indução magnética no ar.

Com os valores do número de voltas dos enrolamento do circuito primário e secundário (N_1 e N_2 , respetivamente), o valor da resistência total no circuito secundário (R_i) e os valores medidos da potência medida pelo wattímetro (P_m), calcula-se a potência de perdas da amostra (P_C) através da equação 3.19 (IEC60404-2, 2008).

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} P_m - \frac{(1.111 \times |\bar{V}_2|)^2}{R_i} \quad (3.19)$$

Na Figura 3.17 está representado um esquema de montagem, onde as bobinas designadas por M se referem às de compensação da indução magnética no ar.

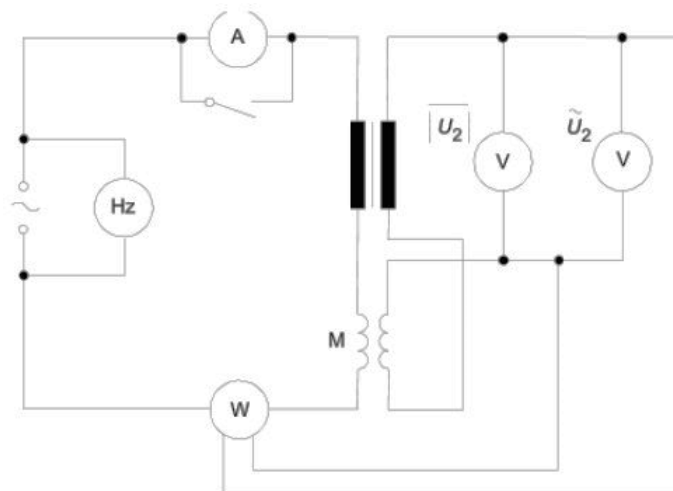


Figura 3.17: Esquema de montagem da ponte de Epstein para medição da potência de perdas pelo método do wattímetro (IEC60404-2, 2008).

Existem algumas variantes da ponte de Epstein, tais como, a ponte de Lloyd-Fisher e a ponte de Churcher. A ponte de Lloyd-Fisher difere da de Epstein no facto de as chapas serem colocadas de modo a que as suas superfícies fiquem perpendiculares à superfície da ponte e as juntas das chapas serem peças separadas de material semelhante ao da amostra (Figura 3.18). Esta alteração torna as medições mais exatas em relação às da ponte de Epstein pois melhora o step-lap nas juntas, zonas com valores do campo de indução magnética diferentes dos obtidos nos braços do aparelho, o que prejudica a distribuição das perdas pela amostra.

A ponte de Churcher é semelhante à ponte de Lloyd-Fisher mas distribui melhor os enrolamentos ao longo do caminho magnético, para uniformizar a magnetização da amostra. Além disso, em vez de cantos amovíveis, tem peças em forma de U (Figura 3.18b).

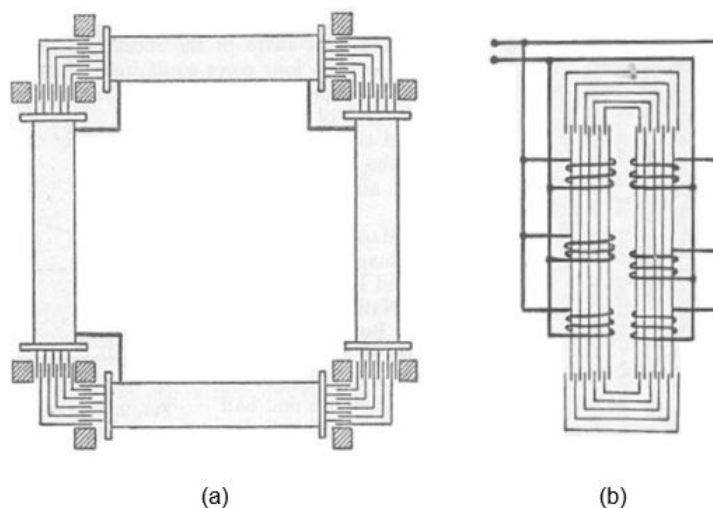


Figura 3.18: Ponte de Lloyd-Fisher (a) (Stout, 1960) e ponte de Churcher (b) (Baldwin, 1973).

Provete

Os provetes, segundo a norma IEC 60404-2, devem ser cortados através de um método que não crie rebarbas e devem ter $30 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ de largura e entre 280 e 320 mm de comprimento. A tolerância das diferenças de comprimento dos vários provetes é de 0.5 mm.

Em aços de grão orientado, os provetes de ser cortados na direção da laminagem, com uma tolerância máxima de $\pm 1^\circ$.

O número de provetes deve ser múltiplo de 4 e segundo a recomendação da norma indiana IS 649 (1997) deve variar consoante a espessura da chapa a ser testada de acordo com a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Número mínimo de provetes em teste em função da espessura da chapa (IS 649, 1997).

Espessura da chapa /mm	Número mínimo de provetes em teste
1.00	12
0.50 a 0.65	16
0.27 a 0.35	20

Enrolamentos

As formas de suporte aos enrolamentos devem ser feitas de um material duro e isolante, como, por exemplo, papel fenólico, ter uma secção transversal com 32 mm de largura interior e ter uma altura aproximada de 10 mm.

Os enrolamentos devem ser fixados a uma base isolante e não magnética de forma a formarem um quadrado.

Cada uma das 4 bobinas deve ter dois enrolamentos, um primário no exterior (mag-

netizador) e um secundário no interior (de tensão).

Os enrolamentos devem ser distribuídos de forma uniforme ao longo de um comprimento mínimo de 190 mm, cada bobina com um quarto do número total de voltas. Os enrolamentos do primário devem estar ligados em série, tal como os do secundário.

O número de voltas do primário e do secundário deve ser adequados à fonte de alimentação, ao equipamento de medição e à frequência a utilizar.

Circuito de compensação

O circuito de compensação está localizado no centro da ponte e é constituído por um circuito primário e um secundário que são concêntricos e o segundo ocupa a posição interior, à semelhança das restantes bobinas da ponte. A bobina primária é ligada em série ao circuito primário da ponte e a bobina secundária é ligada em série às restantes bobinas secundárias mas em oposição de fase, de modo a anular a força eletromotriz do circuito secundário da ponte induzido pela indução magnética no ar.

Fonte de alimentação

A fonte de alimentação deve ter baixa impedância e elevada estabilidade de tensão e frequência (IEC60404-2, 2008).

3.6.2 SINGLE SHEET TESTER

O *Single Sheet Tester* é, tal como a ponte de Epstein, um instrumento para determinar as propriedades magnéticas da chapa de aço elétrico. Gong et al. (2015) construiu um *Single Sheet Tester* com um sistema de tensão e um sistema de medição de deslocamento a laser para investigar a variação da magnetostrição e das propriedades magnéticas da chapa sob tensão (Figura 3.19).

Os sistemas de medição da magnetostrição característica dos aços elétricos estão representados nas figuras 3.20 e 3.21.

O provete de ensaio consiste num pedaço de chapa de aço elétrico introduzida dentro de 2 enrolamentos, um primário colocado externamente e, um secundário, internamente. Deve estar fixo a uma base rígida através de uma braçadeira posicionada numa das extremidades dos enrolamentos.

O fluxo é fechado por um circuito magnético com uma secção transversal muito maior do que a do provete, designado por culassa. São deixadas folgas pequenas e homogêneas entre o provete e a culassa para fragilizar a força eletromagnética entre eles.

O provete de testes é inserido no interior do molde que suporta os enrolamentos e apoiado numa placa de material não-condutor e não-magnético.

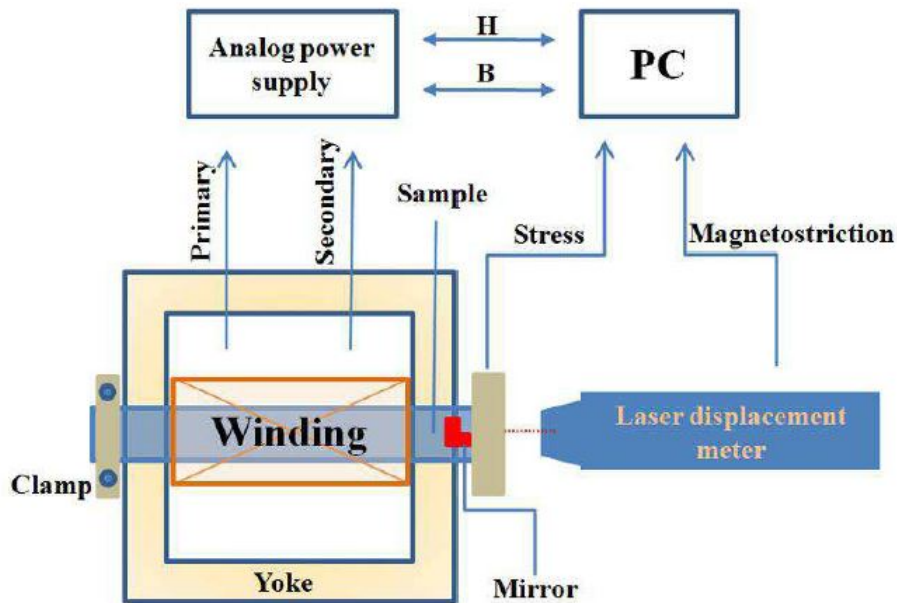


Figura 3.19: Esquema do sistema de medição criado por Gong et al. (2015).

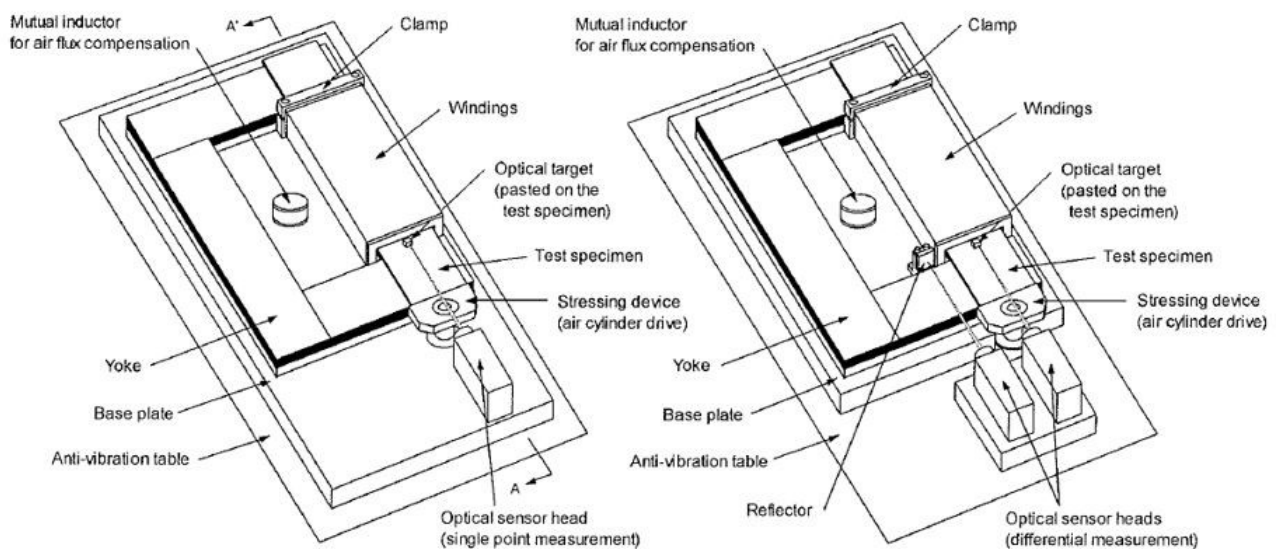


Figura 3.20: Sistema de medição num ponto (à esquerda) e diferencial (à direita) (IEC TR 62581, 2010).

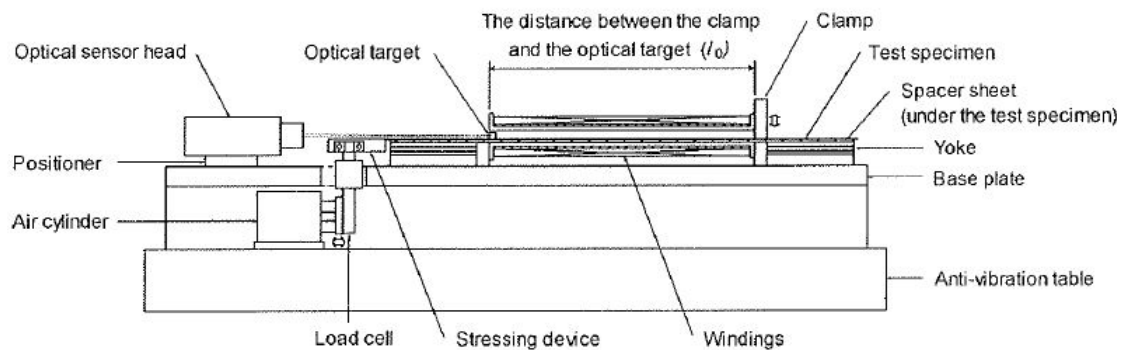


Figura 3.21: Vista lateral do sistema de medição (IEC TR 62581, 2010).

Provete

O provete deve ter, no mínimo, 100 mm de largura e 500 mm de comprimento, deve ser mais comprido do que a culassa para facilitar a montagem e a aplicação de tensões externas na direção longitudinal e deve ser cortado de forma a evitar rebarbas excessivas e deformação mecânica. O ângulo entre a direção de corte e a de laminagem não deve ser superior a 1° para aços elétricos de grão orientado e 5° para aços elétricos de grão não orientado.

Culassa

O culassa pode ser horizontal ou vertical e simples ou duplo (Figura 3.22). Os horizontais fecham o fluxo na horizontal e, os verticais, na vertical. São feitos por empilhamentos de chapas de aço elétrico de grão orientado ou de uma liga ferro-níquel. Deve ser feito um recozimento de alívio de tensões após o corte para reduzir a relutância do material.

Enrolamentos

Os enrolamentos primário e secundário devem ser colocados em torno de um molde retangular feito de material não-condutor e não-magnético. O comprimento do molde deve ser menor do que a distância entre os polos das faces da culassa para evitar o efeito de dispersão dos campos magnéticos entre o provete de testes e as faces dos polos.

O número de voltas do enrolamento primário depende das características da fonte de alimentação e o do secundário depende das características dos instrumentos de medição.

3.6.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA MAGNETOSTRIÇÃO

Antonelli et al. (2005) fez um estudo utilizando um método tridimensional de elementos finitos para analisar o comportamento real dos sistemas de medição Epstein e Single Sheet Tester no domínio do tempo e da frequência. O *Single Sheet Tester* foi capaz de proporcionar resultados mais previsíveis e uma melhor uniformização da indução magnética e do campo magnético na zona da medição (Figura 3.23).

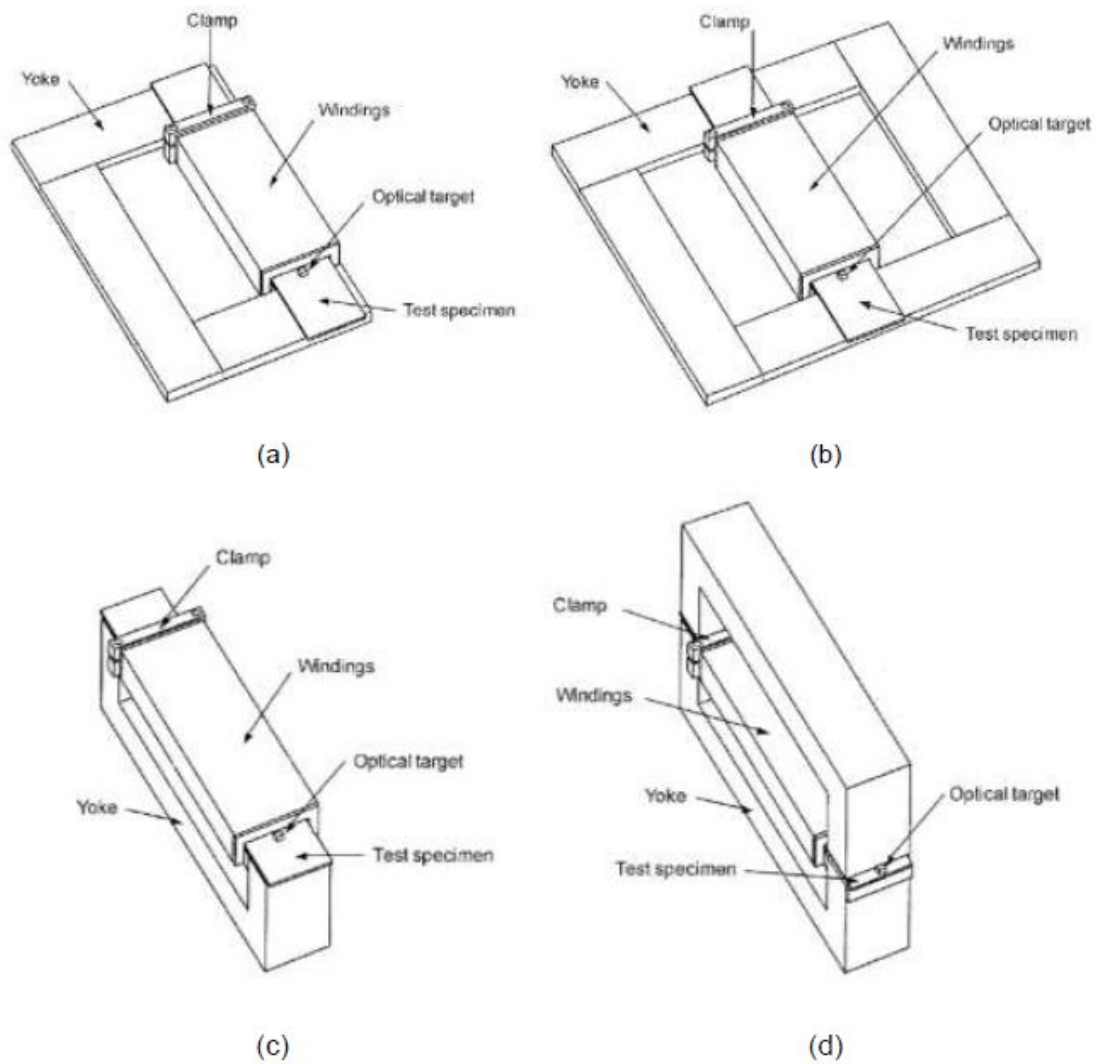


Figura 3.22: Tipos de *yoke*: horizontal simples (a), horizontal duplo (b), vertical simples (c) e vertical duplo (d) (IEC TR 62581, 2010).

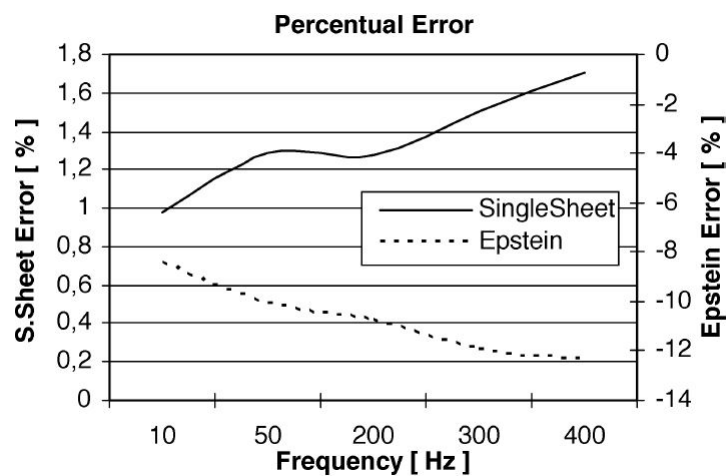


Figura 3.23: Diferença percentual entre os valores da perdas específicas medidos e os calculados (Antonelli et al., 2005).

Sievert and Ahlers (2011) tentaram mostrar, quantificar e explicar as diferenças de carácter estatístico das perdas específicas totais medidas através dos dois métodos em ensaios realizados por vários laboratórios entre 1985 e 2001, a aços elétricos de grão orientado submetidos a densidades de fluxo entre 1.3T e 1.8T obtendo um desvio padrão médio de 2.2%. O autor concluiu ainda que este resultado é semelhante ao obtido por Sievert (1999) e Sievert et al. (2000) (2.0%).

3.7 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

A magnetostricção de um material ferromagnético é definida como uma alteração de dimensões ($\delta L/L$) e pode ser medida sob condições de magnetização provocadas por corrente contínua ou alternada. Quando uma amostra é magnetizada por corrente alternada a 50 Hz, por exemplo, a frequência fundamental da magnetostricção é 100 Hz com harmónicos múltiplos deste valor. Por isso, o sensor de medição da magnetostricção deve ser capaz de captar sinais com gamas características de 100 Hz a 1 kHz.

Os aços de grão orientado com elevado teor de silício apresentam valores de magnetostricção de pico inferiores a 10^{-6} . Valores desta ordem de grandeza requerem transdutores muito sensíveis que produzam sinais proporcionais à magnitude do deslocamento vibratório da extremidade livre da amostra.

3.8 SENSORIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

Um transdutor é um dispositivo que converte um tipo de energia para outro. Para a medição de vibração magnetostritiva é necessário um transdutor que converta energia mecânica para um sinal eléctrico. De seguida, são descritos alguns tipos de transdutores adequados à medição de magnetostricção.

Transformador Diferencial Variável Linear

O transformador diferencial variável linear é um sensor para medição de deslocamento linear. É um dispositivo eletromagnético constituído por uma bobina de excitação primária e duas bobinas secundárias que produzem tensão alternada proporcional ao deslocamento do núcleo magnético cilíndrico que está fixo ou em contacto com a amostra a analisar. Ao deslocar-se, o núcleo induz um fluxo nas bobinas secundárias, resultando numa tensão de saída diferente em cada uma das bobinas secundárias. Estes sensores permitem leituras na gama de 10^{-8} m/m (Klimczyk, 2012).

Stanbury (1984) avaliou um sistema de medição de magnetostricção utilizando este tipo de sensores e observou que o sensor capta um campo disperso durante as medições e encontrou dificuldades em ajustar o sensor na posição zero antes de cada medição. Além disso, um aumento de temperatura resultava num aumento da resistência do fio de cobre das bobinas (Repas, 2007).

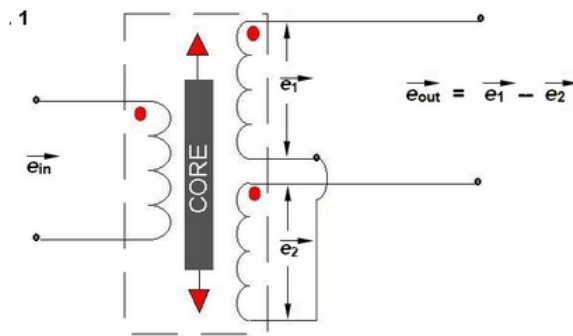


Figura 3.24: Transformador diferencial variável linear (electrical4u, 2009).

Sensores Capacitivos de Deslocamento

Os sensores capacitivos de deslocamento medem a variação da capacidade entre duas placas paralelas do condensador que é proporcional ao seu deslocamento. Na Figura 3.25 está representado um sistema de medição com um sensor de deslocamento capacitivo.

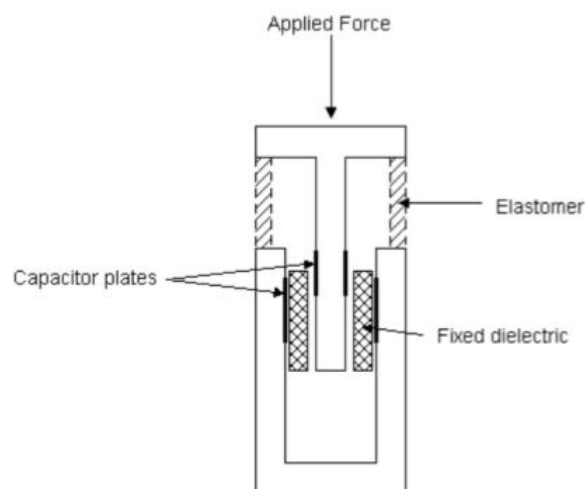


Figura 3.25: Sensores Capacitivos de Deslocamento (Whittaker, 1960).

A eficácia deste tipo de sensor na medição de magnetostricção foi anteriormente investigada por Whittaker (1960), Birss et al. (1978) e George et al. (1962). Apesar de ter uma resolução muito elevada (10^{-10} m/m) e de não ser afetado pelo campo magnético disperso, este tipo de transdutor tem várias desvantagens, tais como, o tempo necessário para definir a folga no condensador antes de cada medição e o facto do material dielétrico no condensador ser o ar e, por isso, a permitividade varia em função da temperatura e da humidade.

Extensómetro

O princípio de funcionamento dos extensómetros elétricos baseia-se numa característica fundamental dos condutores elétricos descoberta em 1856 por Lord Kelvin, segundo a qual a resistência elétrica varia em função de tensão ou deformação a que o condutor está sujeito. No entanto, só a partir dos anos trinta do século XX é que tal

propriedade começou a ser utilizada para medir deformações em estruturas, tendo-se tornado rapidamente numa das técnicas mais poderosas e mais precisas de análise experimental de tensões.

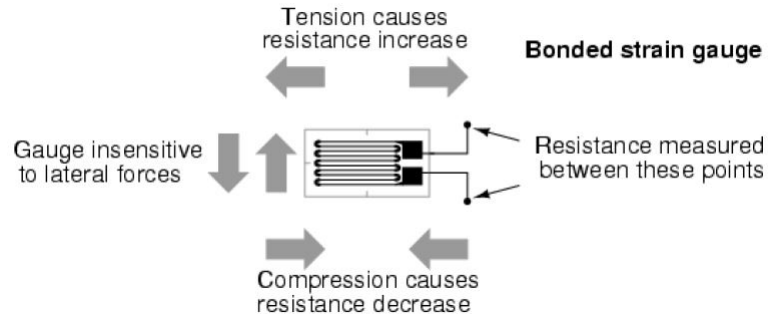


Figura 3.26: Extensómetro (Sensorland, 2010).

O extensómetro é montado sobre um material de suporte e colado na superfície da amostra. As variações de resistência causadas pelas deformações mecânicas do provete e, conseqüentemente, do extensómetro são medidas num circuito do tipo ponte de Wheatstone, que produzem um determinado sinal de saída de tensão. A ponte de Wheatstone é o tipo de circuito mais frequentemente utilizado em extensometria e há várias maneiras distintas de ligar os extensómetros neste circuito: em quarto de ponte, meia ponte e ponte completa (Figura 3.27). A configuração de ponte depende da quantidade de elementos ativos necessários para a medição de tensão. A configuração com mais elementos ativos é o circuito em ponte completa, sendo, por isso, o melhor, e o em quarto de ponte é o pior, por ter apenas um (Gomes and Vaz, 1999).

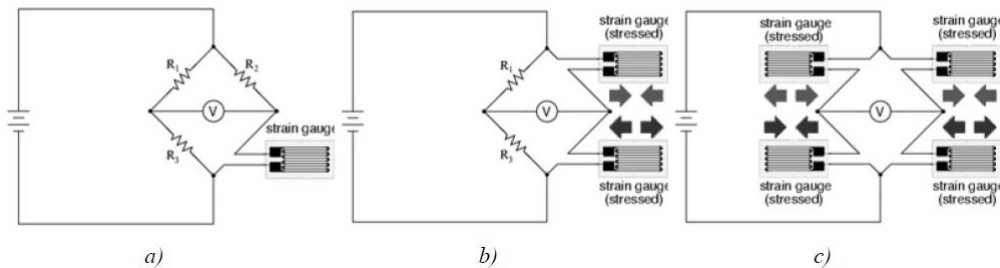


Figura 3.27: Circuitos dos extensómetros em quarto de ponte (a), meia ponte (b) e ponte completa (c) (Sensorland, 2010).

A resolução do extensómetro é de aproximadamente 10^{-7} m/m. A extensometria tornou-se numa técnica vulgar devido à sua simplicidade (Klimczyk, 2012). A extensometria como técnica de medição magnetostrição foi estudada por Anderson (1996) e apresentou várias desvantagens em medições sob tensões (± 10 MPa), tais como, o tempo necessário para a colagem e integração do extensómetro no circuito, o facto de o extensómetro ser extremamente sensível a vibrações verticais e à flexão do provete provocada pelas tensões de compressão aplicadas. Além disso, foi obtido um sinal com muito ruído (até $3 \mu\text{m/m}$) durante a medição da deformação. Os efeitos da temperatura e os campos magnéticos parasitas podem ser cancelados usando um extensómetro *dummy* de compensação.

Técnicas de Medição Óticas

O Vibrômetro Laser Doppler permite, através do efeito Doppler, calcular as frequências de vibração de uma superfície vibratória (Silva, 1999). Na Figura 3.28 está representado um esquema do princípio de funcionamento deste instrumento.

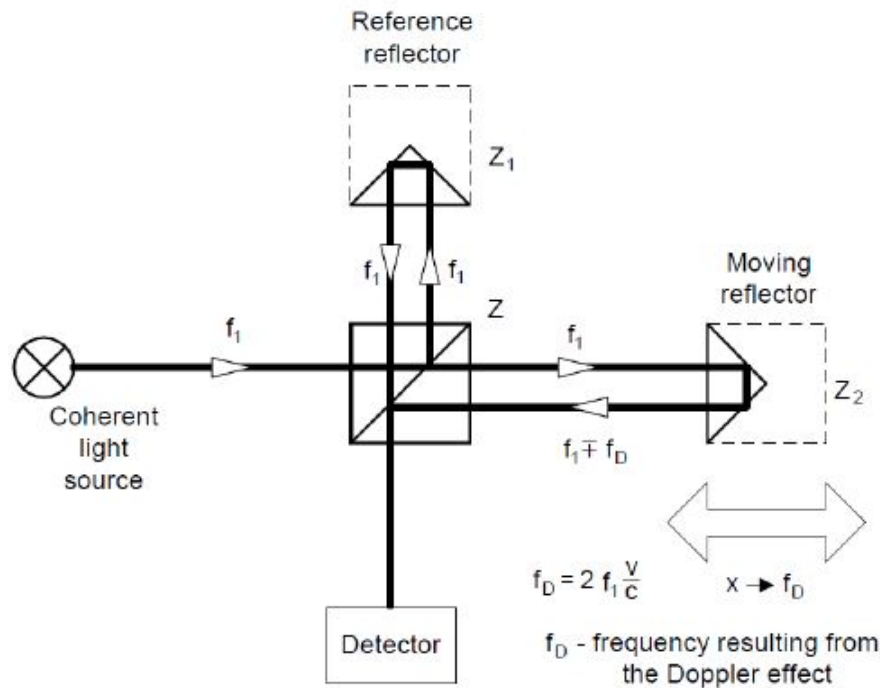


Figura 3.28: Princípio de funcionamento de um vibrômetro laser Doppler.

Uma fonte de luz coerente, que geralmente é um laser de hélio-néon (PolyTec, 2012), com frequência f_1 incide sobre um prisma semitransparente (Z) e divide-se em um feixe de teste e um feixe de referência. O feixe de teste incide no provete (Z_2) e reflete-se com frequências moduladas $f_1 \pm f_D$, o que resulta do efeito Doppler. O feixe de referência incide no refletor (Z_1) e interfere com $f_1 \pm f_D$ no detector. A diferença de frequências é detetada e a amplitude de vibração (v) pode ser calculada através da Equação 3.20 (Phophongviwat, 2013).

$$v = f_D \cdot \frac{h}{2}, \quad (3.20)$$

em que h é o comprimento de onda da luz.

Nakata et al. (1994) relata o primeiro uso da técnica de laser Doppler para medir magnetostrição em chapa de aço com elevado teor de silício, onde foram fixados dois espelhos à mesma distância da superfície da chapa de forma a refletir um laser. A frequência modulada do laser refletido foi integrada para se obter um diferencial de deslocamento dos espelhos. A resolução obtida do laser foi de 4×10^{-8} m/m.

A investigação das técnicas laser foi aprofundada por Nakase et al. (1998), que comparou medições da magnetostrição obtidas através de vibrômetros com um e com dois

lasers. Um dos feixes foi focado no alvo de referência fixo e o outro numa superfície solta do provete. As frequências moduladas dos dois lasers foram retiradas e processadas de forma semelhante à descrita anteriormente para um vibrómetro com apenas um laser. A resolução obtida em ambos os casos foi de 4×10^{-8} m/m.

A vantagem desta técnica é o facto de a medição ser realizada sem haver contacto com o provete, o que significa que as variações de campo magnético não afetam os resultados. No entanto, verificou-se que uma bobina de magnetização ao estar enrolada na amostra dificultava a colocação dos espelhos na superfície da amostra.

Acelerómetro Piezoelétrico

Os acelerómetros piezoelétricos podem ser mono-axiais ou tri-axiais e o seu principal componente é o sensor, uma porção de material piezoelétrico que geralmente é um cerâmico termoelétrico polarizado artificialmente. Na Figura 3.29 está representada a estrutura-base de um acelerómetro de compressão. Quando sujeito a vibrações, o sensor do acelerómetro fica submetido a forças e gera um sinal elétrico proporcional às mesmas e a aceleração é calculada através da relação entre a força e a massa.

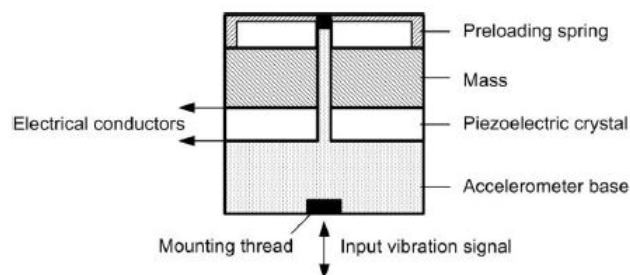


Figura 3.29: Estrutura-base de um acelerómetro (Norton and Karczub, 2003).

Os acelerómetros podem ser montados através de pinos roscados ou encastrados, ceras ou ímanes. O último dos métodos afeta a frequência de resposta do sensor, limitando-a a 6 kHz. Para se seleccionar um acelerómetro, a gama de aceleração, a frequência e a sensibilidade do sinal de tensão de saída têm que ser definidas. Uma relação de compromisso entre uma gama de frequências mais alargada resulta numa menor sensibilidade (Norton and Karczub, 2003).

Um sistema que utiliza dois acelerómetros para medir magnetostrição em chapas sob tensão (± 10 MPa) foi construído pela primeira vez por Stanbury (1984) e desenvolvido por Anderson (2000) (Figura 3.30). Neste sistema, que garantiu resposta estável e uma resolução na ordem de 10^{-8} m/m, o primeiro acelerómetro foi colocado no grampo do cilindro pneumático ligado à extremidade livre do provete e o segundo foi colocado na extremidade fixa. As principais vantagens desta técnica de medição são a possibilidade de utilização numa larga gama de temperaturas e baixo tempo necessário para montagem e configuração.

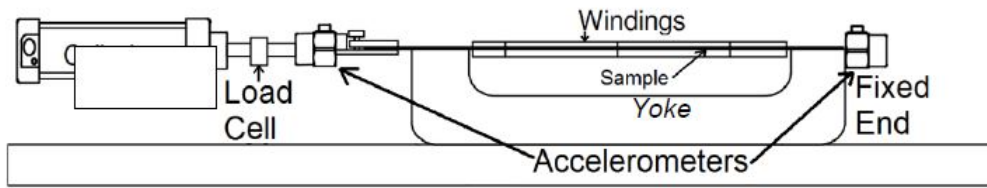


Figura 3.30: Sistema para medição de magnetostricção utilizado dois acelerômetros (Anderson, 2000).

Redes de Bragg em Fibra Ótica

Uma rede de Bragg é essencialmente uma microestrutura de dimensões reduzidas (≈ 10 nm) que pode ser inscrita no núcleo de uma fibra ótica ($\phi_{\text{núcleo}} \approx 10 \mu\text{m}$, $\phi_{\text{fibra}} \approx 125 \mu\text{m}$) por métodos diversos utilizando radiação ultravioleta coerente, ou seja, emitida por um laser. Essa microestrutura consiste numa pequena alteração periódica e localizada do índice de refração, da ordem dos 0.1 %, que tem origem num mecanismo físico denominado fotossensibilidade, particularmente observável em fibras de sílica com elevadas dopagens de germânio ou em fibras óticas normais submetidas a tratamento com hidrogênio a alta pressão (Araújo, 2000).

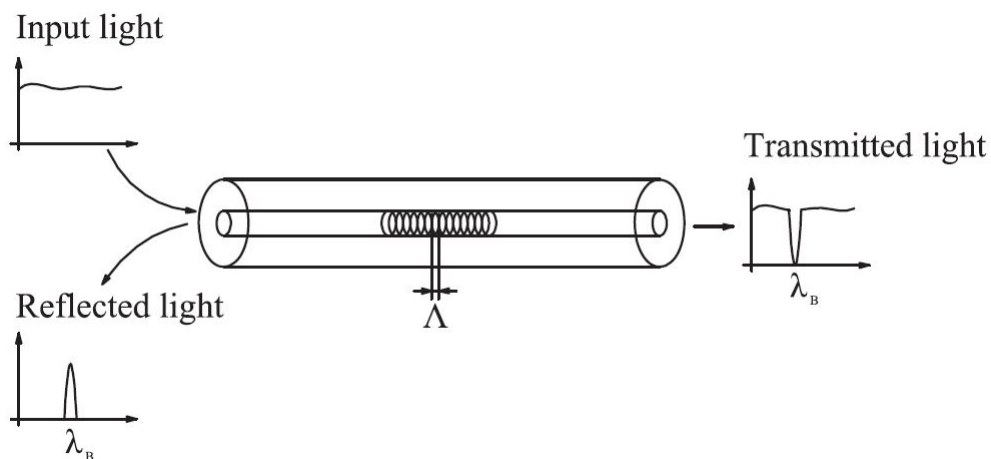


Figura 3.31: Conceito das Redes de Bragg em Fibra Ótica (Peters, 2009).

Quando luz proveniente de uma fonte de espectro largo é guiada pela fibra com uma rede de Bragg e incide na rede de difração, ocorre espalhamento de luz nos planos consecutivos da rede. De uma forma simplificada, pode dizer-se que para cada rede há um determinado comprimento de onda para o qual é satisfeita uma condição de ressonância em que as ondas geradas em cada plano estão em fase, originando uma reflexão forte (Figura 3.31) (Ferreira et al., 2004).

Segundo Othonos and Kalli (1999) e Peters (2009), para a transdução de elevada precisão de deformação e temperatura, as redes de bragg em fibra ótica são a abordagem mais comum e melhor estabelecida que tenha sido estudada extensivamente.

Daou et al. (2010) implementou um sistema de medição de magnetostricção em amostras de pequena dimensão capaz de obter valores de deformação na ordem dos 10^{-7}

m/m.

Comparação dos Transdutores

Para medição uniaxial de magnetostricção é essencial um sensor que tenha uma sensibilidade muito baixa nas restantes direções e que não seja sensível a variações de temperatura e ao campo magnético disperso que lhe possa ser introduzido pelo ambiente que o rodeia. Devem considerar-se também outros fatores, tais como, a necessidade de procedimentos elaborados e morosos de montagem e de calibração se houver a necessidade de medição de uma grande quantidade de amostras. As principais vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas analisadas anteriormente são enumeradas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Comparação dos transdutores.

Técnica de medição	Resolução $m \cdot m^{-1}$	Vantagens	Desvantagens
Transformador Diferencial Variável Linear	10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> Resolução elevada Custo relativamente baixo 	<ul style="list-style-type: none"> Afetado pela temperatura e campo disperso Calibração difícil Contacto direto do sensor com a superfície da amostra
Sensores Capacitivos de Deslocamento	10^{-10}	<ul style="list-style-type: none"> Resolução muito elevada Custo relativamente baixo Não afetado por variações do campo magnético 	<ul style="list-style-type: none"> Calibração difícil
Extensómetro	10^{-7}	<ul style="list-style-type: none"> Custo relativamente baixo para uma pequena quantidade de amostras Procedimento de medição simples 	<ul style="list-style-type: none"> Processo de colagem demorado e que requer habilidades manuais Muito sensível a vibrações verticais e a tensões provocada pela flexão, da chapa quando sujeitas a esforços de compressão Relação sinal obtido/ ruído baixa Contacto direto do extensómetro com a superfície da amostra Custo elevado para uma grande quantidade de amostras

Técnica de medição	Resolução $m \cdot m^{-1}$	Vantagens	Desvantagens
Técnicas de Medição Óticas	4×10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução elevada • Não afetado por variações do campo magnético 	
Acelerómetro piezoelétrico	10^{-8}	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução elevada • Tempo de montagem reduzido • Gama alargada de temperaturas de operação • Não afetado por variações do campo magnético • Custo relativamente baixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto direto do acelerómetro com a superfície da amostra
Fibras Óticas de Bragg	10^{-7}	Não afetado por variações do campo magnético	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto direto do extensómetro com a superfície da amostra • Custo do equipamento elevado • É afetado sensível à temperatura

ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CHAPA MAGNÉTICA

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

4.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

4.3 RESULTADOS

4 ANÁLISE METALGRÁFICA DA CHAPA MAGNÉTICA

4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

É mencionado por alguns autores (Gong et al. (2015), Schoppa et al. (2003), Healthcote (1996), por exemplo) que o corte da chapa pode deformar a microestrutura da chapa e, em consequência, aumentar as perdas e piorar o comportamento magnetostriativo. Por isso, fez-se uma análise metalográfica para averiguar o tamanho de grão, e a orientação do grão e averiguar se a deformação da microestrutura provocada pelo corte era detetável.

4.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

4.2.1 CORTE

Foram cortadas cinco amostras de um pedaço de chapa com 300 mm de comprimento e 30 mm de largura do tipo PowerCore® H 105-30 fabricada pela Thyssenkrupp, usando para o efeito uma guilhotina, de acordo com a Figura 4.1.

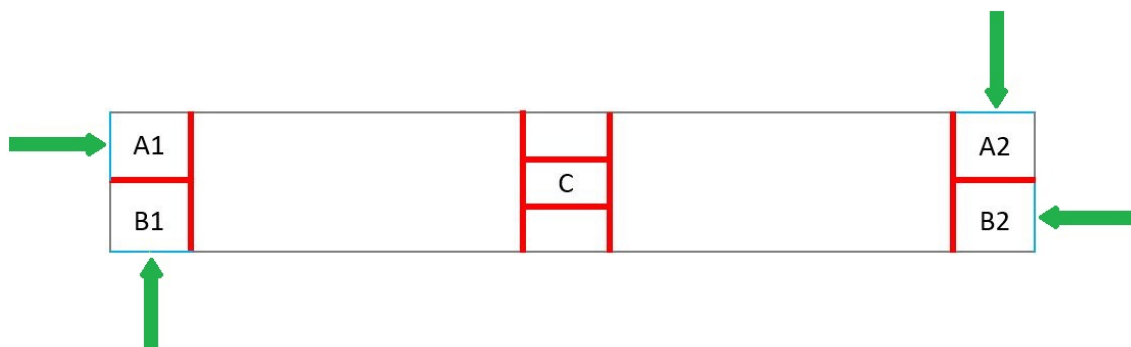


Figura 4.1: Esquema do provete do qual foram cortadas as amostras para análise.

4.2.2 MONTAGEM DAS AMOSTRAS

As amostras foram embutidas a quente em baquelite, com a disposição representada na Figura 4.2, para facilitar o manuseamento e evitar danificar a lixa ou pano de polimento.

A máquina utilizada nesta operação foi a Struers Predopress (Figura 4.3). A montagem foi efetuada a 180 °C de temperatura com 20 kN de força e os tempos de aquecimento e de arrefecimento foram de 8 e 4 minutos, respetivamente. Foram utilizados 30 cm³ de resina.

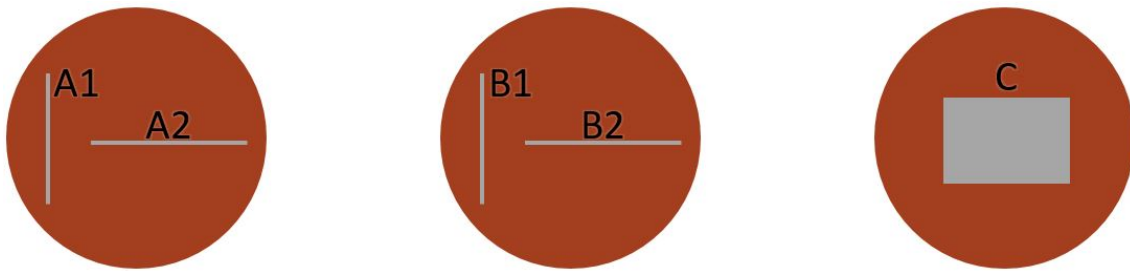


Figura 4.2: Esquema das amostras montadas.



Figura 4.3: Máquina Struers Predopress utilizada para a montagem das amostras a quente.

4.2.3 LIXAMENTO

A operação de lixamento tem por objetivo regularizar a superfície, tendo em conta marcas mais profundas, conferindo-lhe um melhor acabamento, preparando-a para o polimento. Foi utilizada uma lixa com granulometria de 1200 partículas abrasivas por polegada quadrada, na máquina de lixamento Rotopol-1 da marca Struers (Figura 4.4) a 150 rpm, a velocidade mínima de operação da máquina, utilizando água como lubrificante. A pressão exercida na amostra durante a operação foi a necessária para garantir um contacto homogêneo com a lixa.



Figura 4.4: Máquina Struers Rotopol-1 utilizada para o lixamento das amostras.

Houve o cuidado de lixar o mínimo possível as amostras A e B, uma vez que se pretendia analisar o efeito do corte. A amostra C foi lixada com a mesma lixa e nas mesmas condições que as restantes, até remover por completo o revestimento.

Após o lixamento, as amostras foram lavadas com água corrente e álcool e secas com ar comprimido.

4.2.4 POLIMENTO

O polimento é feito para eliminar riscos provenientes do lixamento e obter um acabamento superficial praticamente espelhado, facilitando assim a observação a microscópio. A operação consistiu em duas etapas, a primeira com uma solução de pó de diamante de $3\ \mu\text{m}$ e a segunda com uma de $1\ \mu\text{m}$. Tratando-se de um material duro, o polimento foi feito a 300 rpm, a velocidade máxima de funcionamento da máquina Struers Rotopol-1 (Figura 4.5).

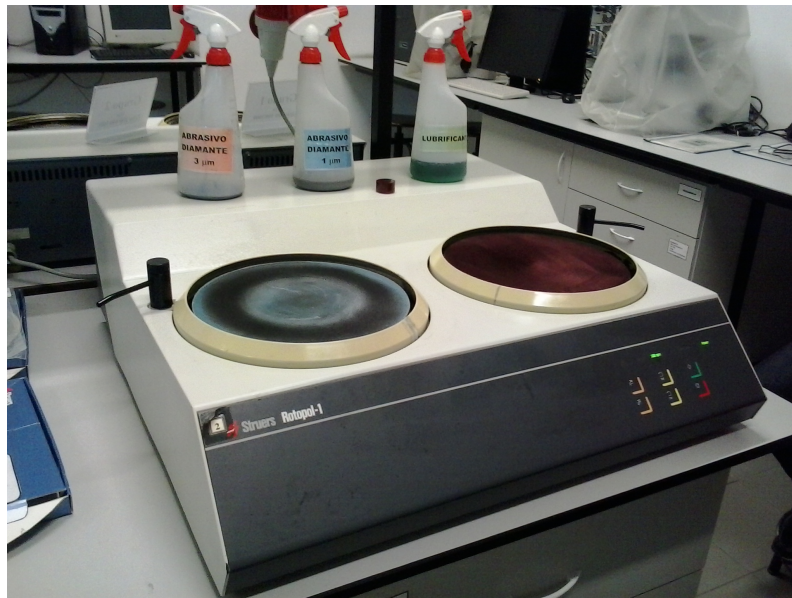


Figura 4.5: Máquina Struers Rotopol-1 utilizada para o polimento das amostras.

Aquando da transição entre abrasivos e no final no polimento, as amostras foram lavadas com água corrente e álcool e secas com ar comprimido.

4.2.5 ATAQUE QUÍMICO

O ataque químico tem o propósito de permitir a identificação dos contornos de grão e das diferentes fases na microestrutura do material. Os reagentes são escolhidos em função do material a atacar e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica.

O reagente utilizado foi o nital a 4% de concentração e o ataque foi feito imergindo a superfície da amostra na solução durante 2 minutos.

4.2.6 REGISTO FOTOGRÁFICO

O registo fotográfico das amostras foi feito no microscópio Olympus BX51M com uma ampliação de 50x.

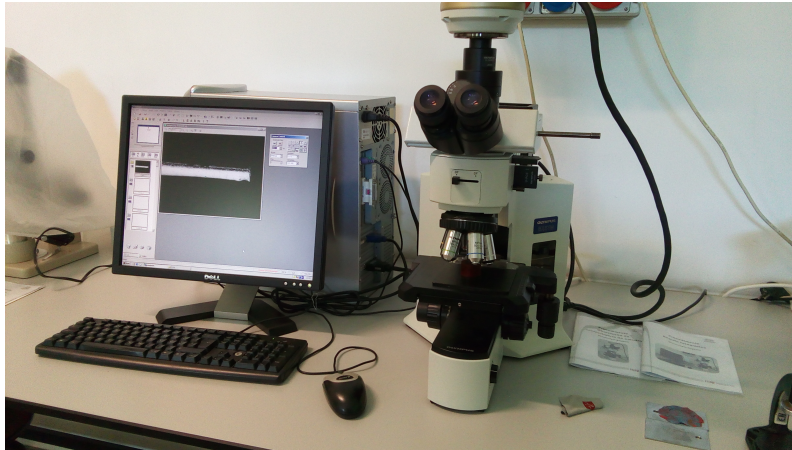


Figura 4.6: Microscópio Olympus BX51M utilizado para o registo fotográfico das amostra.

4.3 RESULTADOS

Após o ataque químico da amostra C, verificou-se de imediato que os grãos da chapa eram tão grandes que se conseguiam ver a olho nu (Figura 4.7).

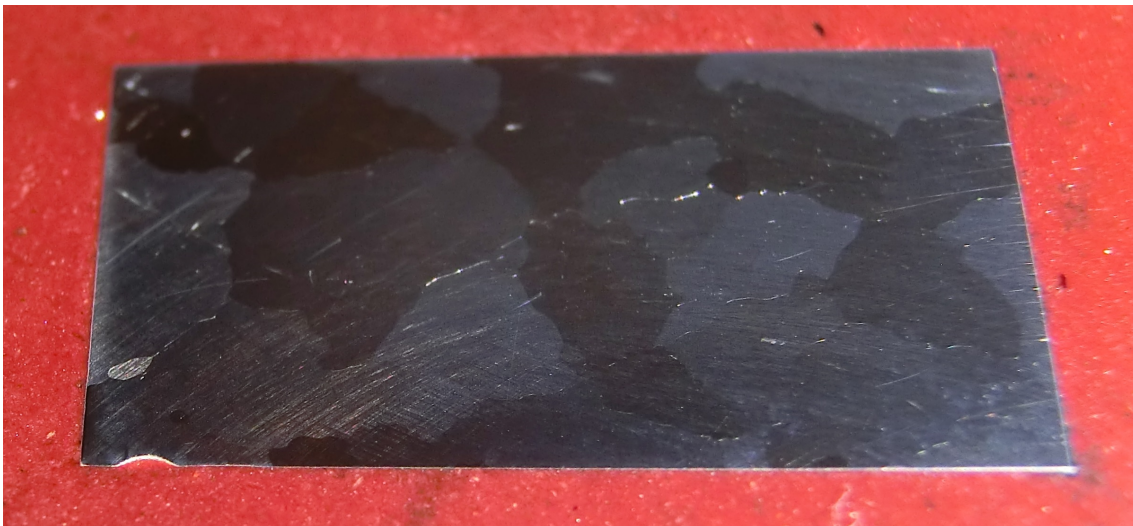


Figura 4.7: Superfície da amostra C após o ataque químico.

A Figura 4.8 é uma montagem de um conjunto de cerca de 100 fotografias tiradas na ampliação mínima permitida pelo microscópio (50x) ao longo da área da amostra. As fronteiras de grão foram delineadas a vermelho, para facilitar a sua identificação. É perceptível pela análise das imagens recolhidas da amostra C que alguns dos grãos são mais compridos na direção da laminagem, mas essa tendência é pouco pronunciada.

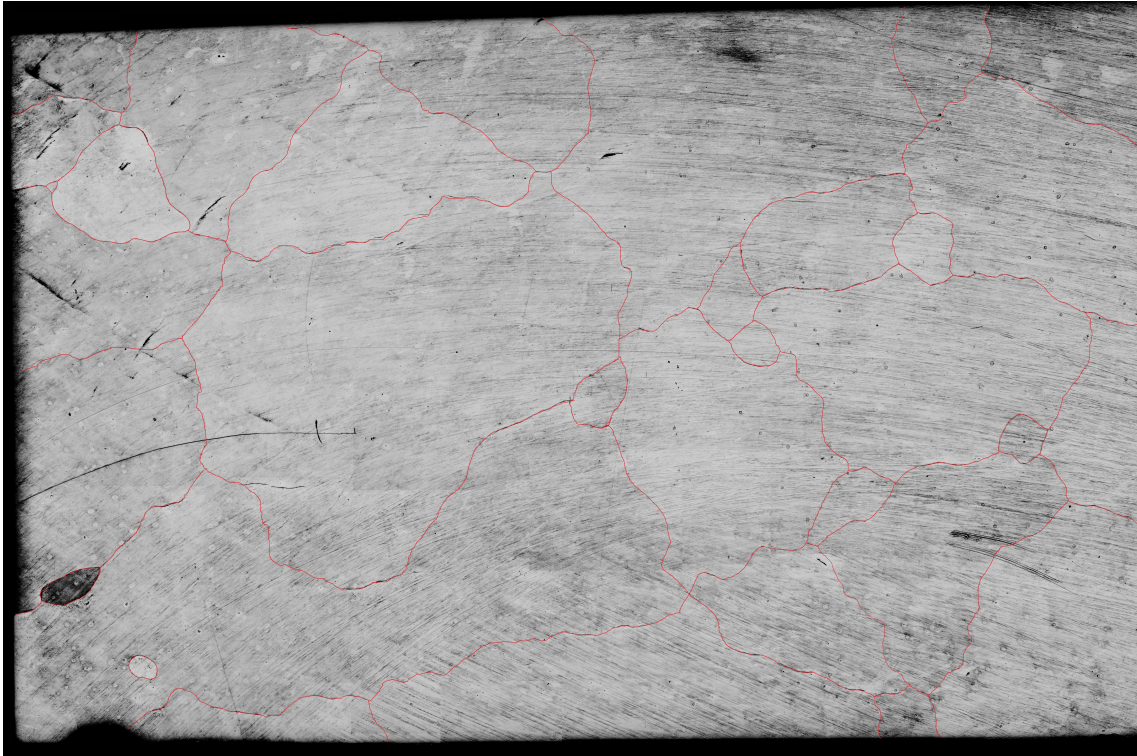


Figura 4.8: Superfície da amostra C após o ataque químico.

Analisado as amostras A1 e A2, foi possível notar-se que os grãos são mais longos na direção da laminagem (Figura 4.9). Nas amostras B1 e B2 essa diferença não é tão notória (Figura 4.10). Na direção da laminagem, as fronteiras de grão são menos perceptíveis e geralmente estão mais distantes umas das outras, especialmente no caso das amostras B1 e B2, o que prova que o grão tende a estar mais orientado nessa direção.



Figura 4.9: Registro fotográfico das amostras A1 (cima) e A2 (baixo).



Figura 4.10: Registro fotográfico das amostras B1 (cima) e B2 (baixo).

Devido ao tamanho do grão na chapa, não é possível identificar deformação do mesmo provocada pelo processo de corte da chapa. Apenas é visível uma ligeira rebarba em cada uma das extremidades cortadas.

SISTEMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

5.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5.3 PROGRAMAÇÃO EM LABVIEW E ANÁLISE DE DADOS

5 SISTEMA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

5.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

A ponte Epstein existente na EFACEC está de acordo com as especificações da norma IEC60404-2 (2008). Os enrolamentos primário e secundário têm ambos 700 voltas e o comprimento do caminho magnético é 0.94 m. Os provetes a utilizar têm que ter 300 mm de comprimento e 30 mm de largura.

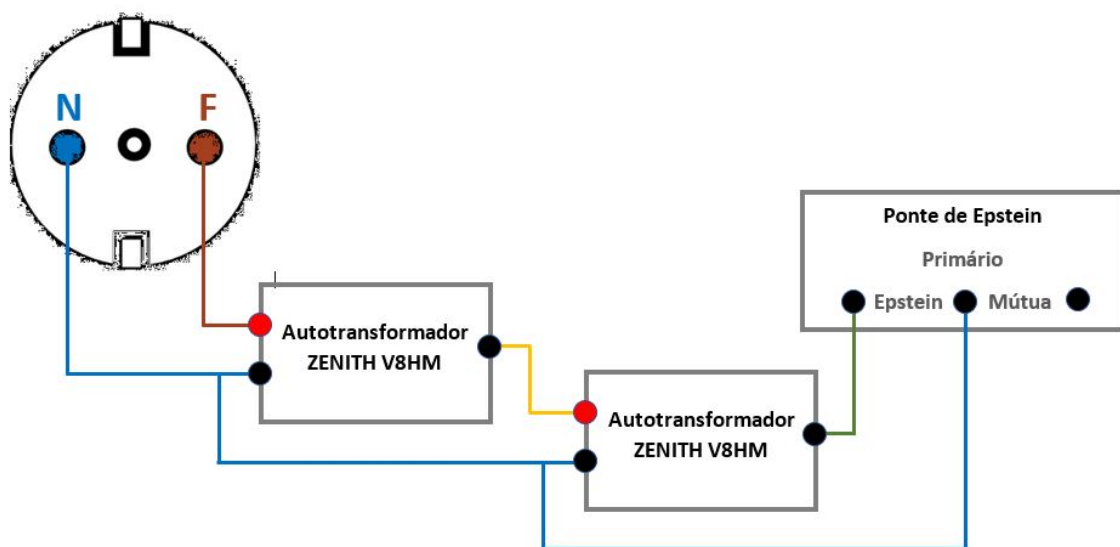


Figura 5.1: Esquema do circuito de alimentação da ponte Epstein.

O enrolamento primário é alimentado por dois autotransformadores da marca Zenith e modelo V8HM ligados de acordo com o esquema da Figura 5.1. O motivo que justifica a utilização de dois autotransformadores é a possibilidade de regular a tensão com mais precisão.

Para medição da magnetostricção foi utilizado um extensómetro 6/350 XY31-3L-7.5M da marca HBM que permitia medir deformações em duas direções. Tem uma resistência de $350\Omega \pm 0.35\%$, um fator de $2.06 \pm 1.0\%$ na direção a e $2.05 \pm 1.0\%$ na direção b com um coeficiente de temperatura de $93 \pm 10 \cdot 10^{-6}/K$; é capaz de compensar o efeito das variações de temperatura de aços com expansão/dilatação térmica $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}/K$ entre -10 e 45 °C e tem uma sensibilidade transversal de 0.3% em ambas as direções.

O extensómetro foi colado na zona central da superfície da chapa onde o revestimento tinha sido removido previamente de forma a permitir uma melhor adesão e que fossem medidas as deformações nas direções de laminagem da chapa e na transversal à mesma (Figura 5.2).

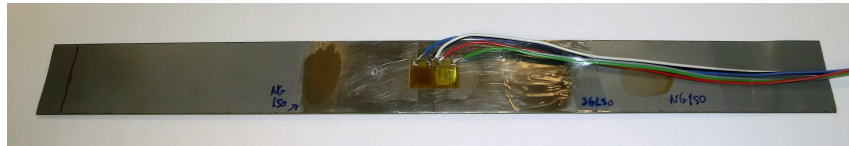


Figura 5.2: Chapa instrumentada com o extensômetro e utilizada nas medições.

A chapa com o extensômetro foi colocada na cavidade da bobina lateral esquerda e sempre que eram feitas medições com várias chapas era colocada no topo (Figura 5.3).

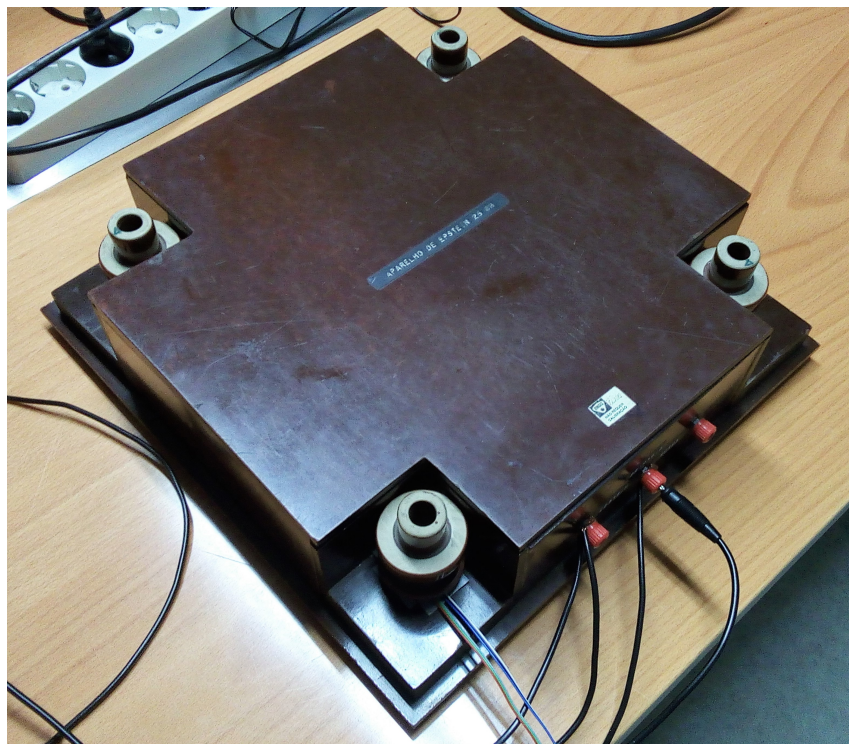


Figura 5.3: Ponte de Epstein com a chapa com o extensômetro colado em posição.

5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A base do sistema de aquisição de dados é o chassi cDAQ-9188 National Instruments com 8 *slots*. Nele são montados três módulos: o NI 9236, o NI 9227 e o NI 9244 para adquirir os sinais de deformação, de corrente e de tensão, respectivamente (Figura 5.4). O módulo NI 9236 recebe os sinais elétricos provenientes de extensômetros os quais são colocados num circuito de Ponte de Wheatstone numa montagem em quarto de ponte; é adequado para medição de deformações dinâmicas. O módulo NI 9227 tem 4 canais e permite medir corrente numa gama até 5 A_{rms} e até 14 A de corrente máxima de pico em cada canal. O NI 9244 tem 3 canais e consegue medir 400V_{rms} linha-neutro ou 800 V_{rms} linha-linha. Os módulos de aquisição de tensão e corrente são emparelhados no sistema experimental de acordo com o esquema da Figura 5.5.



Figura 5.4: Componentes do sistema de aquisição de dados da National Instruments.

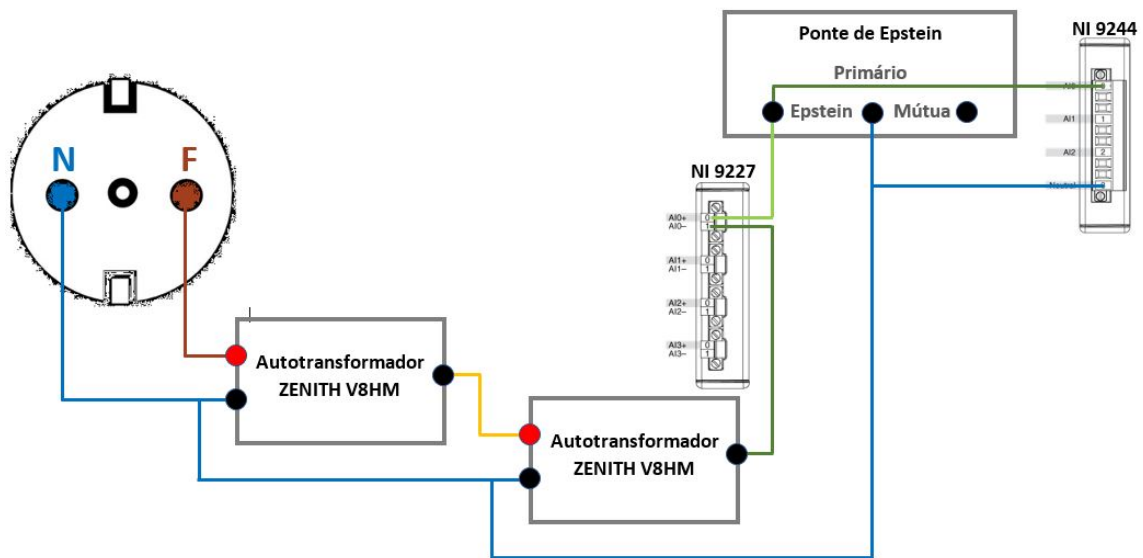


Figura 5.5: Esquema do circuito de alimentação da ponte Epstein com os módulos de aquisição de tensão e corrente.

5.3 PROGRAMAÇÃO EM LABVIEW E ANÁLISE DE DADOS

5.3.1 APLICAÇÃO MSLAB DESENVOLVIDA EM LABVIEW

Funcionalidades do Software LabVIEW Utilizadas

Aquisição dos dados

Os sinais de deformação, tensão e corrente obtidos pelo hardware são recebidos por uma série de VI's (virtual instruments), aos quais são ligados controlos para a configuração dos parâmetros (Figura 5.6).

Cálculo da indução magnética e da intensidade de campo magnético

Através do sinal da tensão no circuito secundário V_2 e dos valores do número de espiras do enrolamento secundário N_2 e da área da secção transversal A , obtém-se o sinal

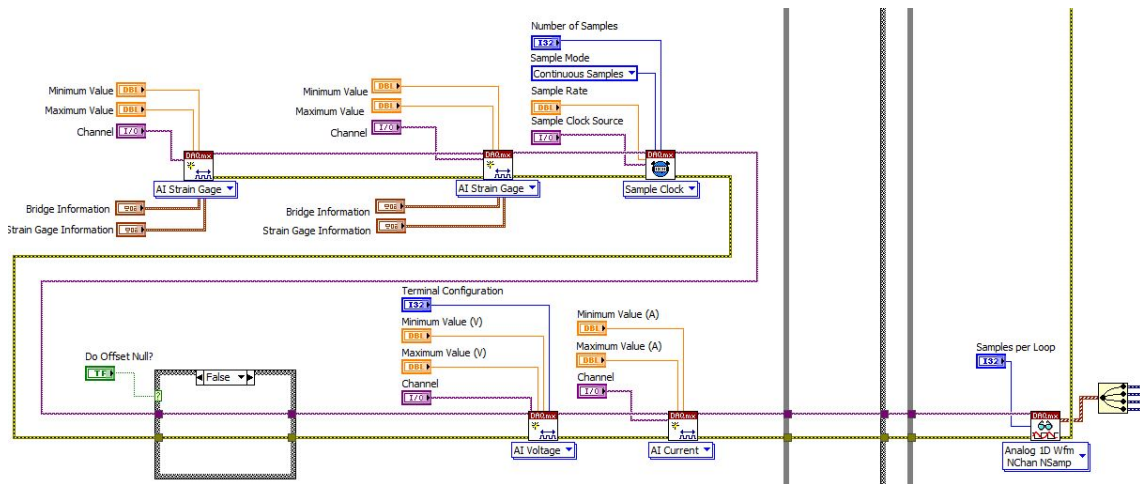


Figura 5.6: Código LabVIEW para receber os dados medidos e configurar o hardware.

de indução magnética da amostra B ,

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \times A} \int V_2(t) dt. \quad (5.1)$$

O código de LabVIEW que permite obter a função $B(t)$ está representado na Figura 5.7. Tornou-se necessário fazer uma correção utilizando a função *Curve Fitting* para eliminar o declive que se verificava ao integrar a função $V(t)$ (Figura 5.8).

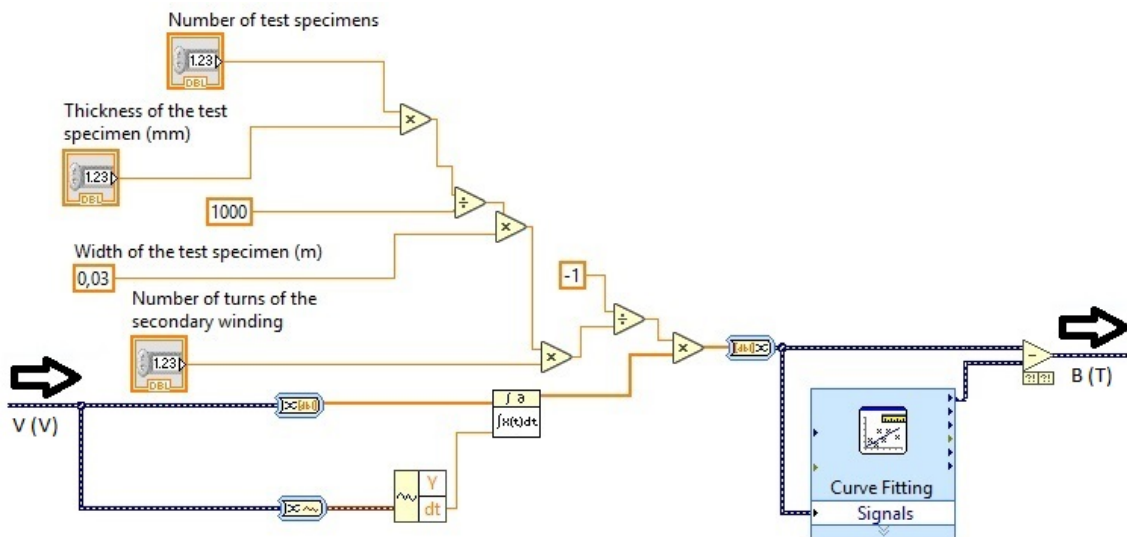


Figura 5.7: Código LabVIEW para o cálculo da indução magnética.

Através do sinal da corrente I_2 e dos valores do número de voltas do enrolamento primário N_1 e comprimento do caminho magnético l , obtém-se o valor da intensidade do campo magnético H ,

$$H(t) = \frac{N_1 \times I_2(t)}{l}. \quad (5.2)$$

Em LabVIEW, a equação 5.2 expressa-se através do código da Figura 5.9.

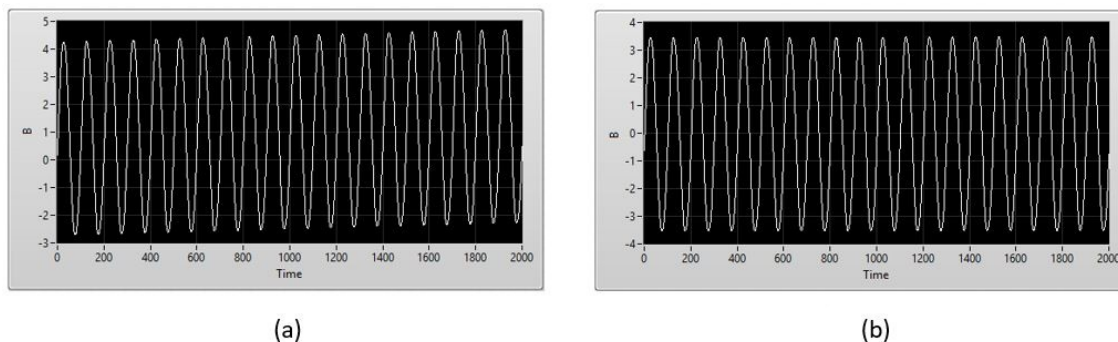


Figura 5.8: Função $B(t)$ antes da correção do declive provocado pela integração (a) e depois da correção (b).

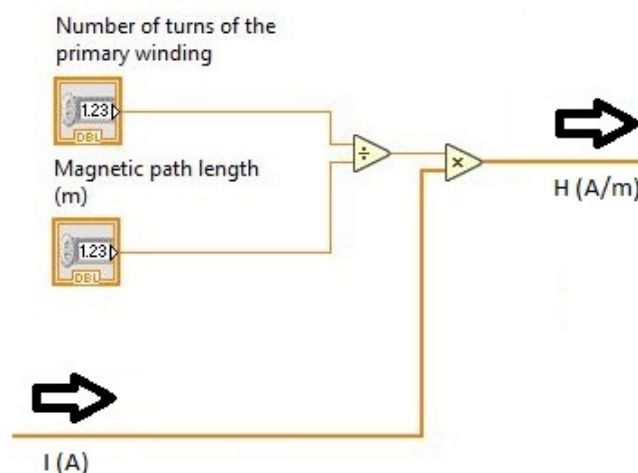


Figura 5.9: Código LabVIEW para o cálculo da intensidade de campo magnético H .

Filtragem do sinal de deformação

Como já referido anteriormente, para um sinal tensão de alimentação do sistema de 50 Hz, verifica-se que a magnetostricção possui frequências de valores múltiplos de 100 Hz. O sinal medido foi submetido a 10 filtros passa-banda com frequências de corte inferior e superior 10 Hz abaixo e acima das frequências fundamentais da magnetostricção (Figura 5.11). Analisado o espectro dos sinais de magnetostricção obtidos nas medições preliminares, considerou-se que as frequências superiores a 1000 Hz múltiplas de 100 teriam um impacto muito pouco relevante no sinal de magnetostricção e, por isso, não foram contabilizadas (Figura 5.10).

O recurso do LabVIEW utilizado para filtrar o sinal foi o *Filter VI* (Figura 5.12).

Ciclo de Histerese

A representação do ciclo de histerese foi feita através da função *Build XY Graph*, à qual foram ligados o sinal da intensidade do campo magnético à entrada relativa ao eixo x e da indução magnética à do eixo y .

Curva de Borboleta

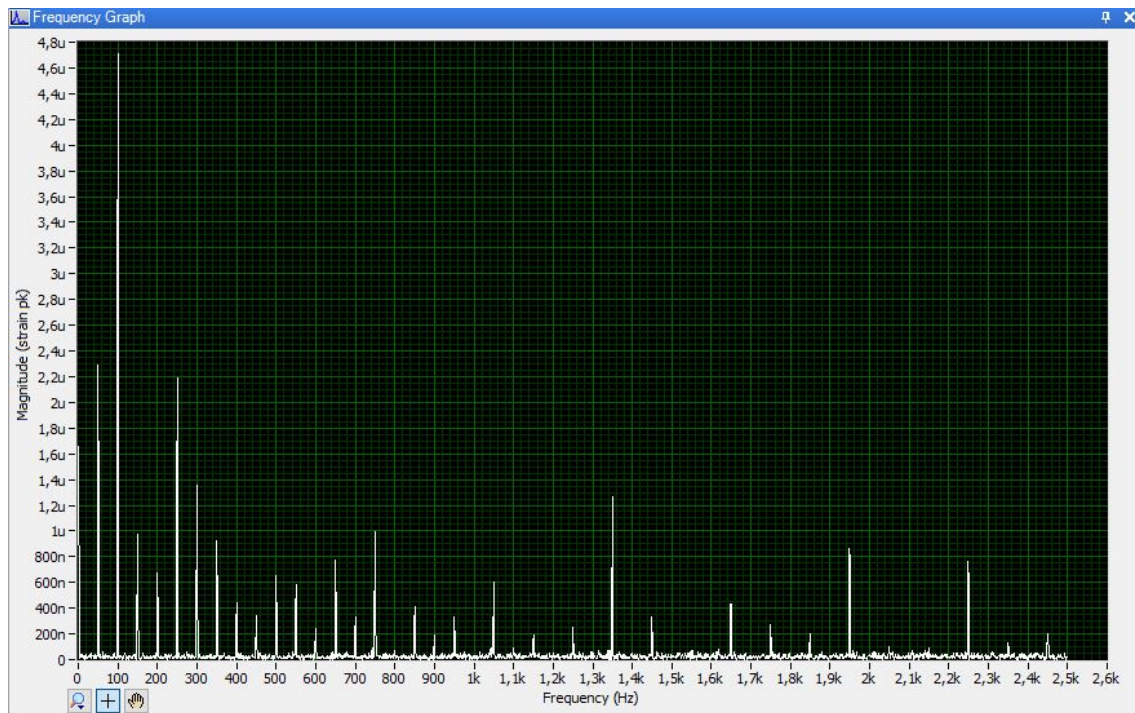


Figura 5.10: Espectro de sinal de magnetostricção obtido nas medições preliminares.

As curvas de borboletas, tal como o ciclo de histerese, são representadas através da função *Build XY Graph*. Neste caso, a indução magnética surge no eixo x e a magnetostricção no eixo y .

Para tornar os processos de aquisição e gravação dos dados expeditos criou-se uma aplicação em LabVIEW, à qual se deu o nome msLAB. Pretendia-se que fosse possível ler os sinais de deformação, tensão e corrente obtidos pelos módulos NI 9236, NI 9244 e NI 9227 em tempo real e gravá-los durante um determinado intervalo de tempo para posterior reprodução na aplicação ou processamento externo noutro software.

Interface

No painel principal da aplicação, além dos botões de início e paragem da execução da aquisição/leitura dos dados e de gravação, foi colocado um *display* com os valores mínimos e máximos de tensão, corrente, indução magnética, intensidade de campo magnético e deformações nas direções de laminagem (RD) e transversal à laminagem (TD) da chapa. Todos os campos para configuração de parâmetros e restantes *displays* estão distribuídos em seis separadores (Figura 5.15).

No primeiro separador, designado por *Setup*, é possível definir-se se se vai usar a aplicação no modo de aquisição de dados (*Aquisition*) ou no modo leitura de dados previamente gravados (*Playback*), selecionando o sub-separador correspondente. No sub-separador *Aquisition* devem ser selecionados os canais de deformação, corrente e tensão e introduzidos alguns parâmetros gerais da medição, tais como o número de voltas dos enrolamentos primário e secundário, o comprimento do caminho magnético, o número de provetes e a sua espessura, o número de amostras por ciclo, a taxa de amostragem

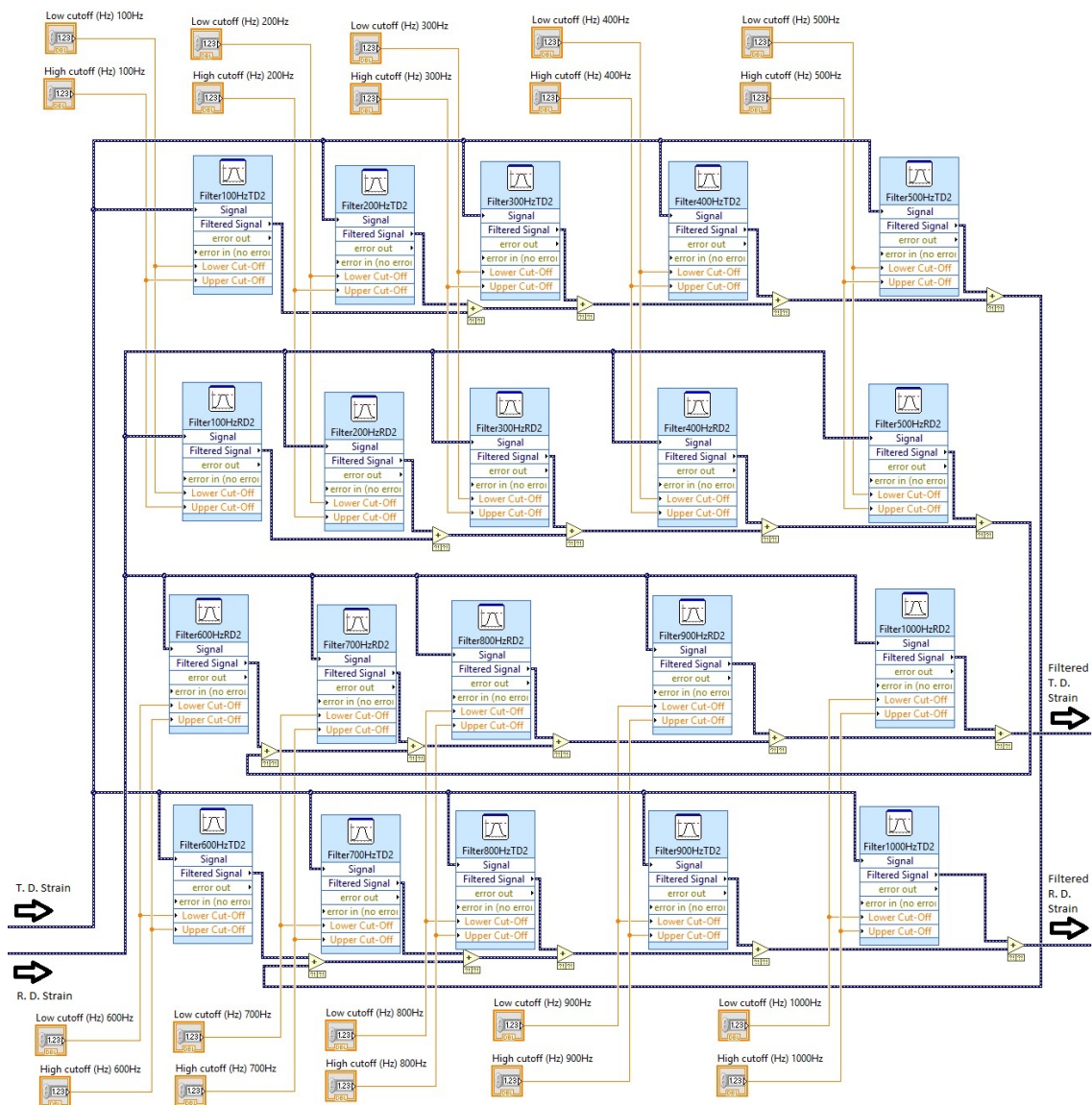


Figura 5.11: Conjunto de filtros utilizados para filtragem dos sinais de deformação.

e a localização onde serão guardados os ficheiros que contêm os dados (Figura 5.16). No sub-separador *Playback* deve ser introduzida a localização do ficheiro com os dados gravados anteriormente a ler (Figura 5.17).

Optou-se por colocar os dados referentes à magnetostrição no segundo separador, *Mechanical Measurements*. Nesse separador encontram-se um botão com a designação *Enable Offset Null* que permite ajustar as deformações dos extensómetros para zero antes de iniciar as medições, uma tabela com as frequências de corte inferior e de corte superior dos vários filtros disponíveis e dois sub-separadores designados por *Rolling Direction Strain* e *Transverse Direction Strain*. No primeiro dos sub-separadores constam gráficos com os sinais de deformação não filtrada, deformação filtrada e respetivos espectros das deformações na direção de laminagem (Figura 5.18). O segundo sub-separador tem gráficos idênticos ao primeiro referentes à deformação transversal à direção de laminagem

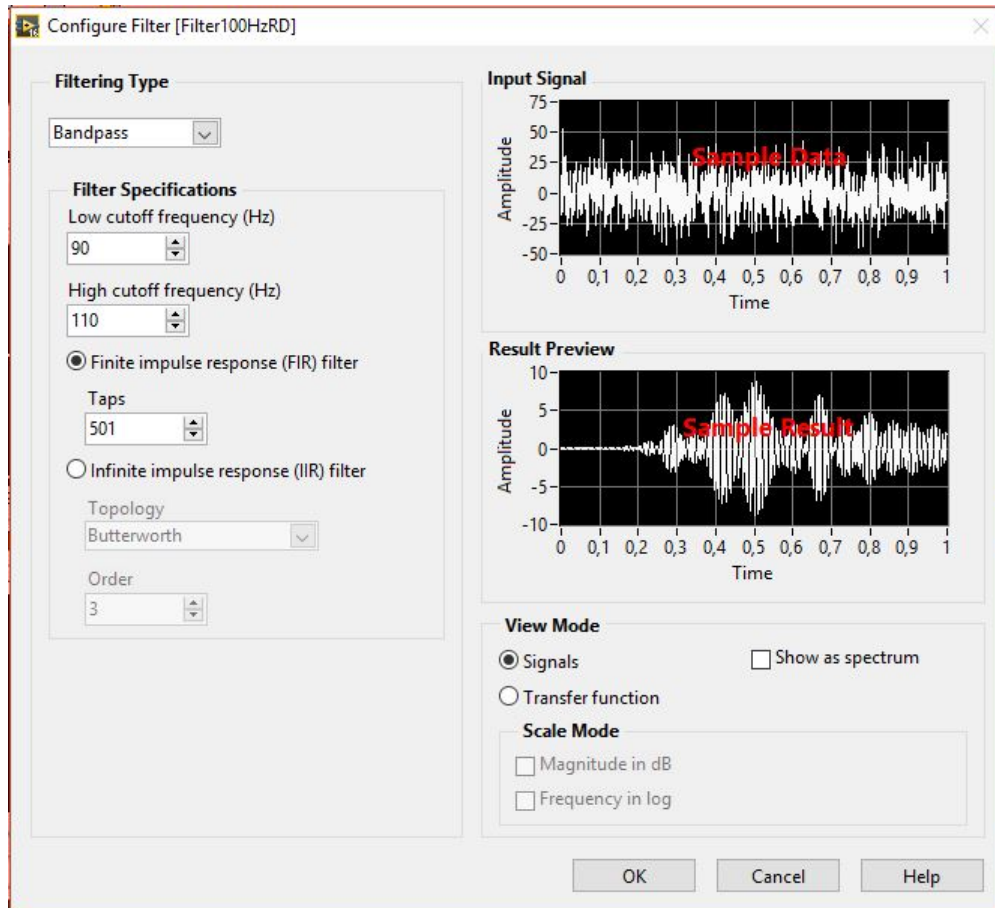


Figura 5.12: Interface do *Filter VI* do LabVIEW.

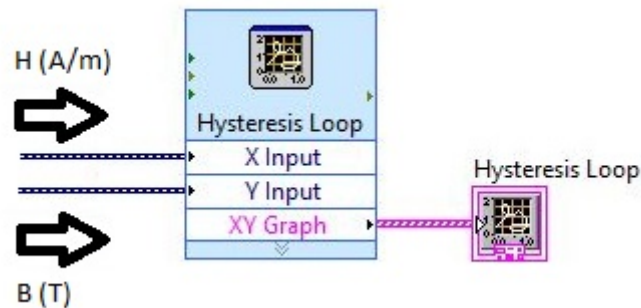


Figura 5.13: Código LabVIEW para representação do ciclo de histerese.

(Figura 5.19).

Os dados relativos aos valores de corrente e de tensão medidos e respectivos espectros são representados no separador *Electrical Measurements* (Figura 5.20).

No quarto separador são apresentados os valores de indução magnética e intensidade de campo magnético e o ciclo de histerese resultante dos mesmos (Figura 5.21).

No separador 5 são representadas as curvas de borboleta relativas às deformações

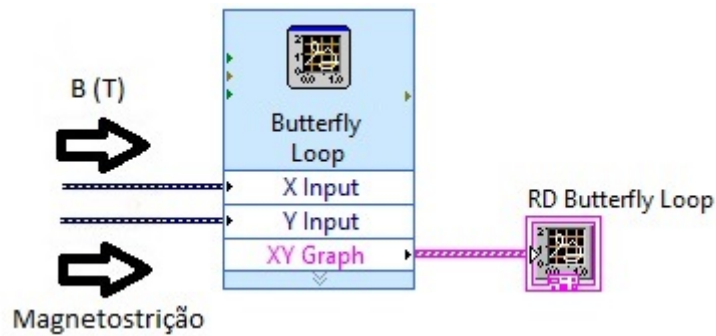


Figura 5.14: Código LabVIEW para representação da curva de borboleta.

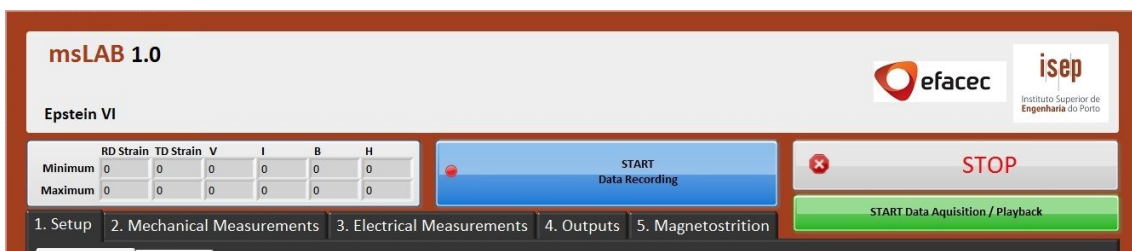


Figura 5.15: Cabeçalho, botões de início e paragem e separadores da aplicação msLAB.

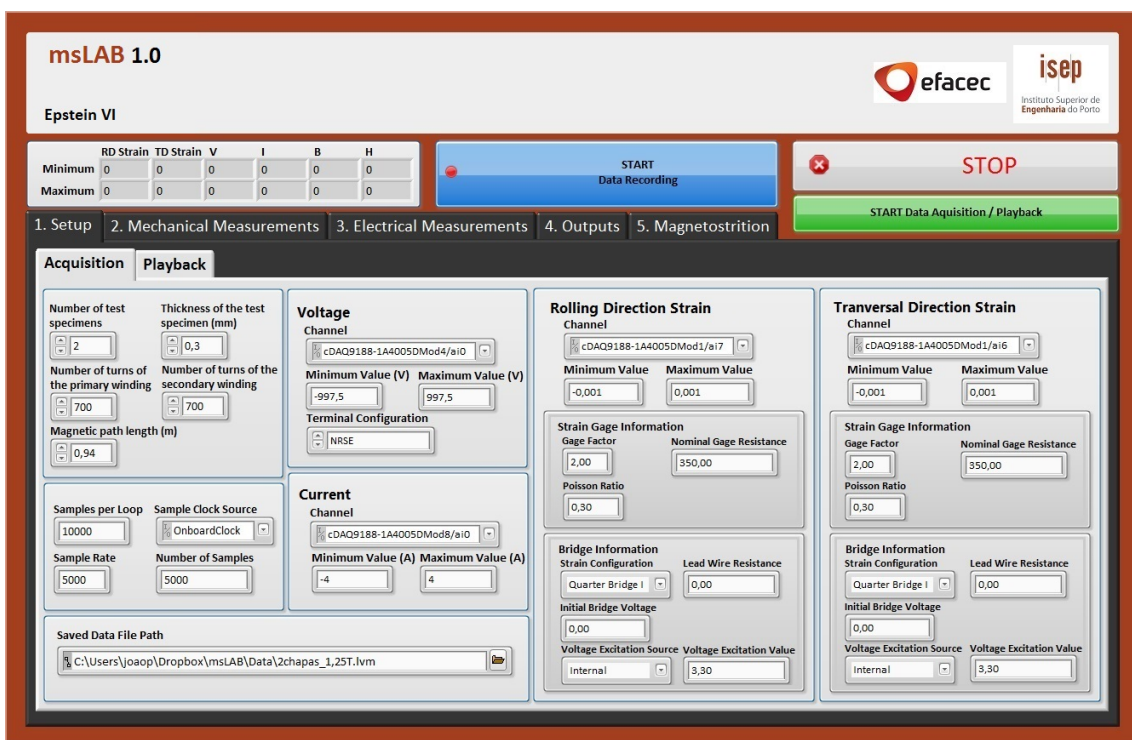


Figura 5.16: Sub-separador *Aquisition* do separador *Setup* da aplicação msLAB.

nas direções longitudinal e transversal relativamente à laminagem da chapa (Figura 5.22).

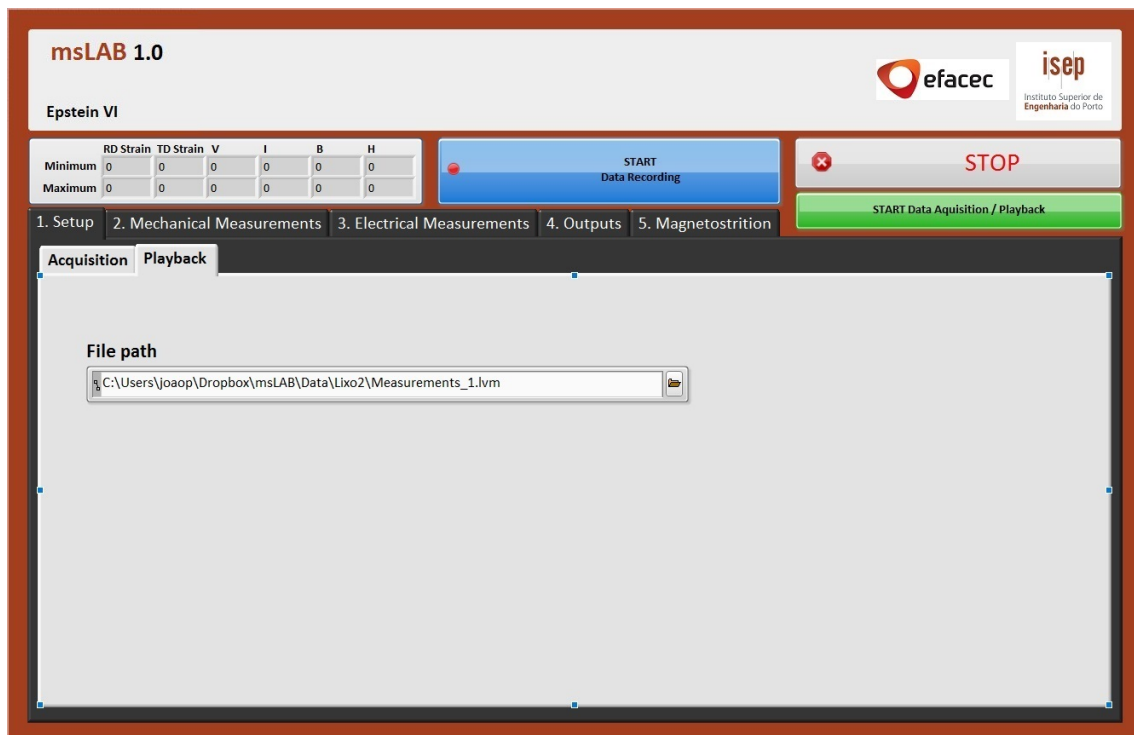


Figura 5.17: Sub-separador *Playback* do separador *Setup* da aplicação msLAB.



Figura 5.18: Sub-separador *Rolling Direction Strain* do separador *Mechanical Measurements* da aplicação msLAB.



Figura 5.19: Sub-separador *Tranverse Direction Strain* do separador *Mechanical Measurements* da aplicação msLAB.



Figura 5.20: Separador *Electrical Measurements* da aplicação msLAB.



Figura 5.21: Separador *Outputs* da aplicação msLAB.



Figura 5.22: Separador *Magnetostriction* da aplicação msLAB.

5.3.2 FOLHAS DE CÁLCULO

Para processamento e análise dos dados obtidos nos ensaios foram criados quatro ficheiros Excel.

Magnetostricção

Foram criados dois ficheiros independentes para processar os dados relativos à magnetostricção, um para os da direcção da laminagem, designado por *RD Strain*, e o outro para os da transversal à mesma, designado por *TD Strain*. Cada um desses ficheiros contém oito folhas de cálculo, sendo seis delas correspondentes a cada um dos ensaios efetuados, uma contém cálculos auxiliares para o cálculo das características da magnetostricção de ponderação A e outra contém gráficos de comparação dos vários ensaios.

Na Figura 5.23 encontra-se a secção *Analised Data* da folha de cálculo onde são introduzidos os dados do ensaio com uma chapa. Na zona designada por *Raw data* devem ser introduzidos os dados de indução magnética e de magnetostricção filtrada provenientes dos ficheiros gravados pela aplicação MsLab durante os ensaios. De seguida, devem ser selecionados intervalos desses dados correspondente a dois ciclos completos de magnetostricção para preencher as zonas verde e amarela, designadas por *With phase delay adjustment* e *Without phase delay adjustment*, respetivamente. Na zona verde deve efectuar-se um acerto de fase dos sinais, garantindo que o intervalo de dados selecionado começa no primeiro valor positivo do ciclo no caso da magnetostricção na direcção da laminagem e no primeiro valor negativo do ciclo, no caso da direcção transversal à laminagem. Na segunda zona, é apenas necessário garantir que a série de dados relativa à indução comece no início de um ciclo e que a da magnetostricção comece no mesmo instante de tempo. Nas colunas ao lado são calculados os valores de pico e pico-a-pico dos ciclos dos intervalos selecionados.

Na zona designada por *Raw data* da secção *Spectrum Data* da folha de cálculo devem ser introduzidos os dados da amplitude do sinal em função da frequência provenientes da aplicação msLAB e são selecionadas automaticamente as frequências fundamentais da magnetostricção (Figura 5.24). Estes dados permitem calcular os valores de ruído de ponderação A (secção *A-weighted Magnetostriction*) e representar os espectros.

À direita da secção *A-weighted Magnetostriction* são representados em gráficos as curvas de borboleta, os sinais de indução e de magnetostricção em função do tempo, os valores de pico, de pico-a-pico da magnetostricção e a velocidade e a aceleração do nível de ruído de ponderação A em função da indução relativos e os espectros que mostram a amplitude da magnetostricção nas suas frequências fundamentais aos dados introduzidos nas secções anteriores da folha.

A última folha de cálculo do ficheiro permite comparar os gráficos presentes nas restantes folhas (Figura 5.26).

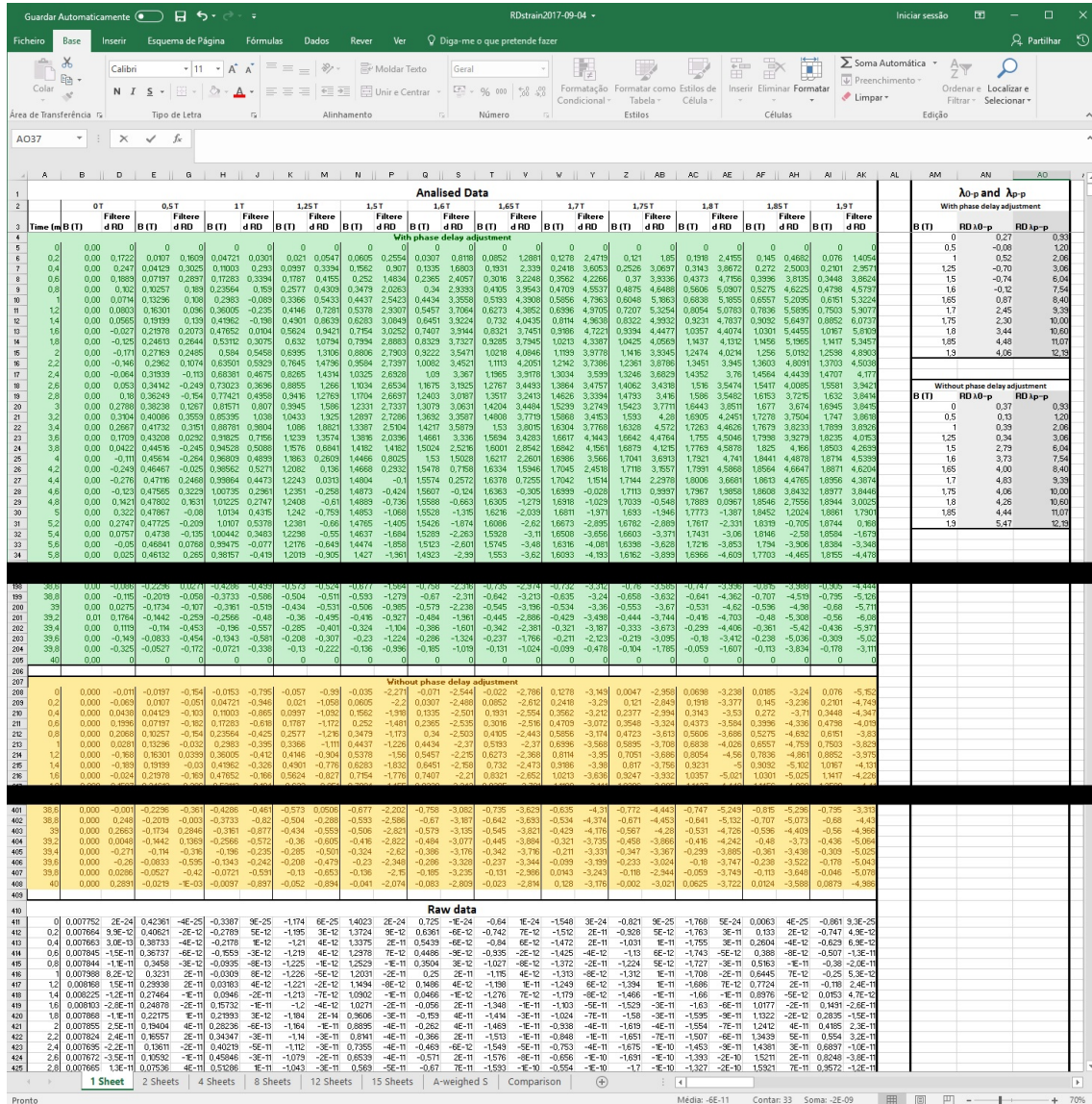


Figura 5.23: Secção da folha de cálculo onde são introduzidos e calculados os valores de pico-a-pico e pico.

Corrente e tensão

O ficheiro para análise dos sinais de corrente e tensões é constituído por sete folhas. As seis primeiras são relativas a cada um dos ensaios efetuados e na última é possível comparar os dados presentes nas anteriores.

Os valores medidos ao longo dos ensaios devem ser introduzidos na zona *Raw data* da secção *Analised data*. Posteriormente, devem ser selecionados intervalos desses valores correspondente a dois ciclos completos para serem analisados e devem ser colados na zona colorida acima da última. Imediatamente à direita, os ciclos dos sinais selecionados são representados em gráficos (Figura 5.27).

Na mesma folha há mais duas secções, *Voltage Spectrum Data* (Figura 5.28) e *Current Spectrum Data* (Figura 5.29), onde nas respetivas zonas designadas por *Raw data*

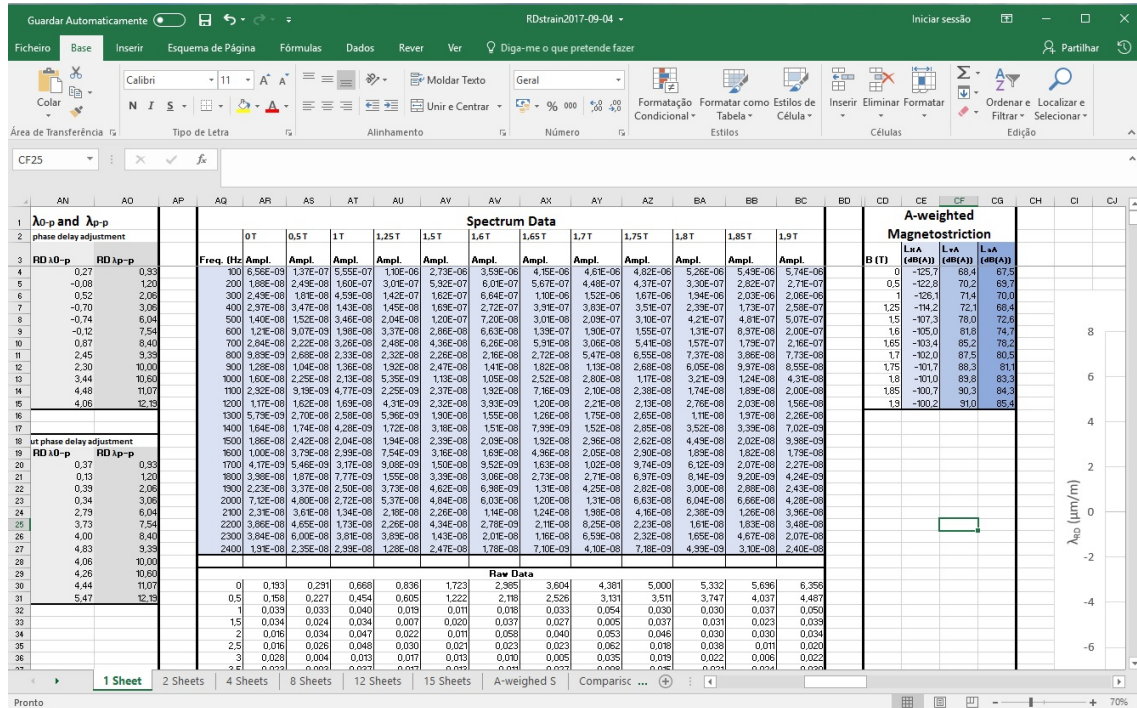


Figura 5.24: Secção da folha de cálculo onde são introduzidos os valores de amplitude dos ciclos em função frequência e selecionados os valores das frequências fundamentais da magnetostricção e calculados os valores de ruído de ponderação A.

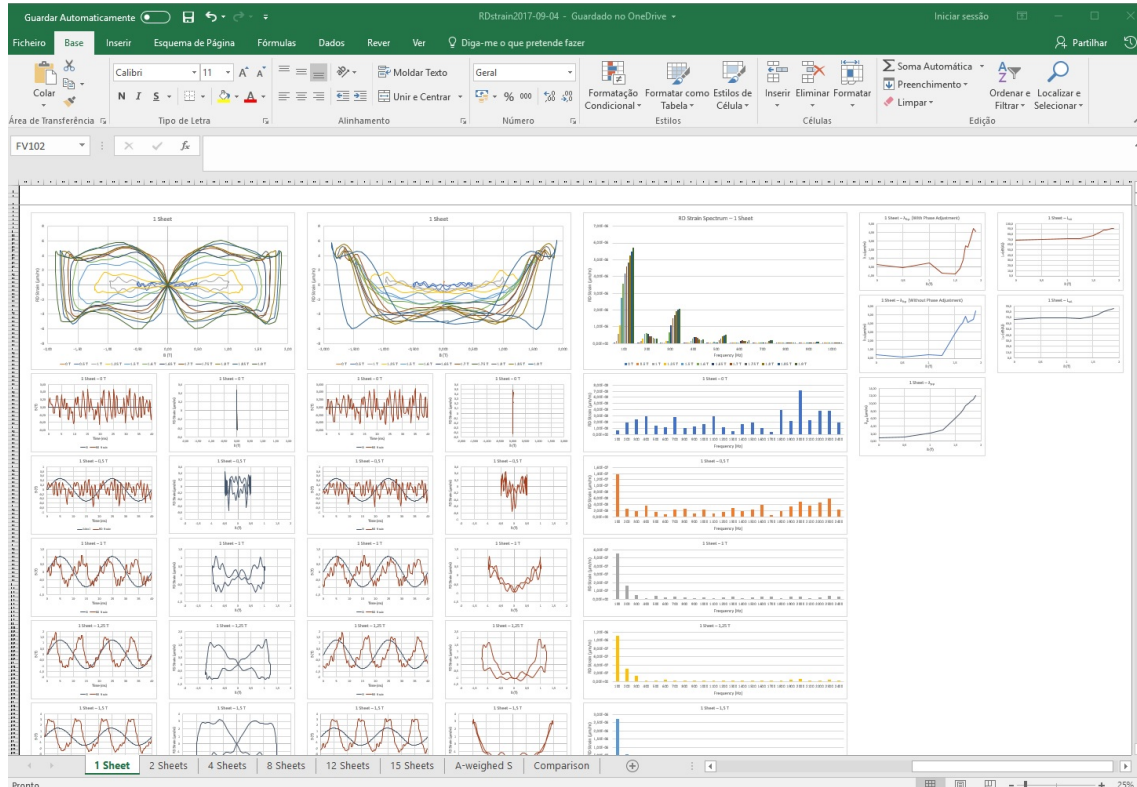


Figura 5.25: Secção da folha de cálculo onde são criados gráficos a partir dos dados introduzidos na folha.

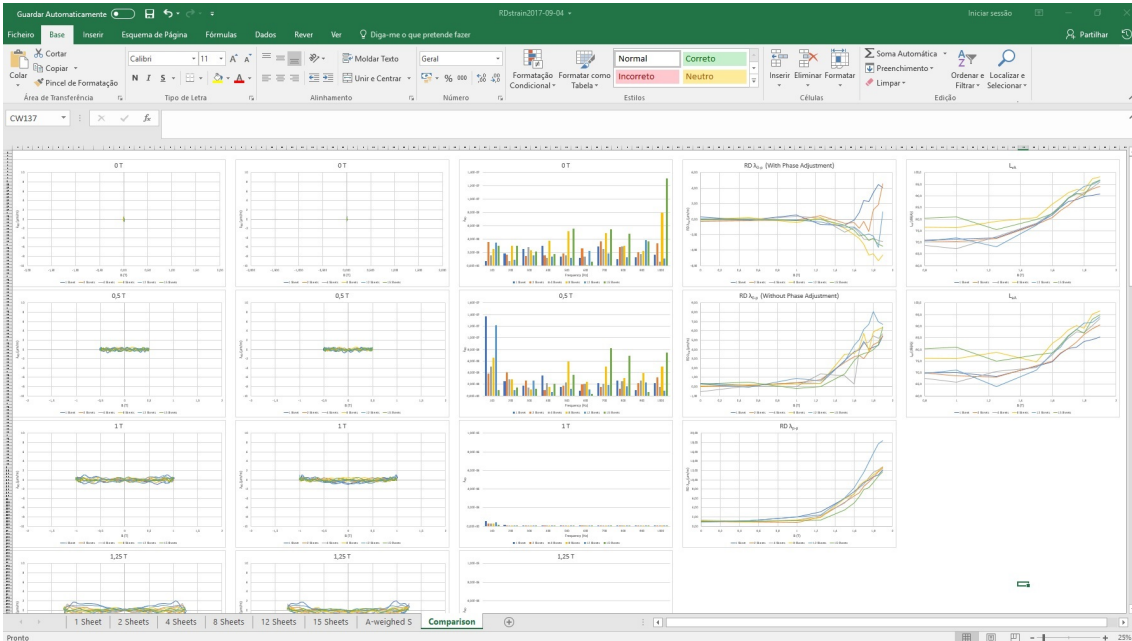


Figura 5.26: Folha de cálculo onde são representados os gráficos de comparação dos vários ensaios.

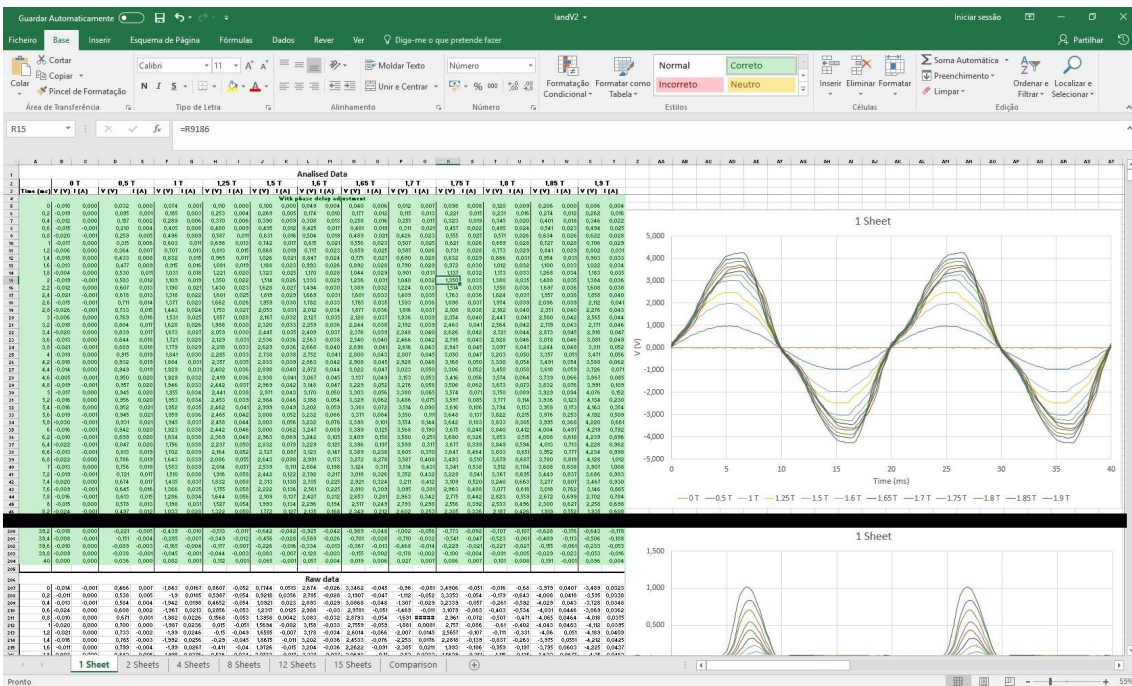


Figura 5.27: Seção da folha de cálculo onde são representados gráficos dos sinais de corrente e de tensão a partir dos valores de medidos.

devem ser introduzidos os dados da amplitude do sinal em função da frequência provenientes da aplicação msLAB. As frequências fundamentais da corrente e da tensão são selecionadas automaticamente na zona colorida e representadas em gráficos.

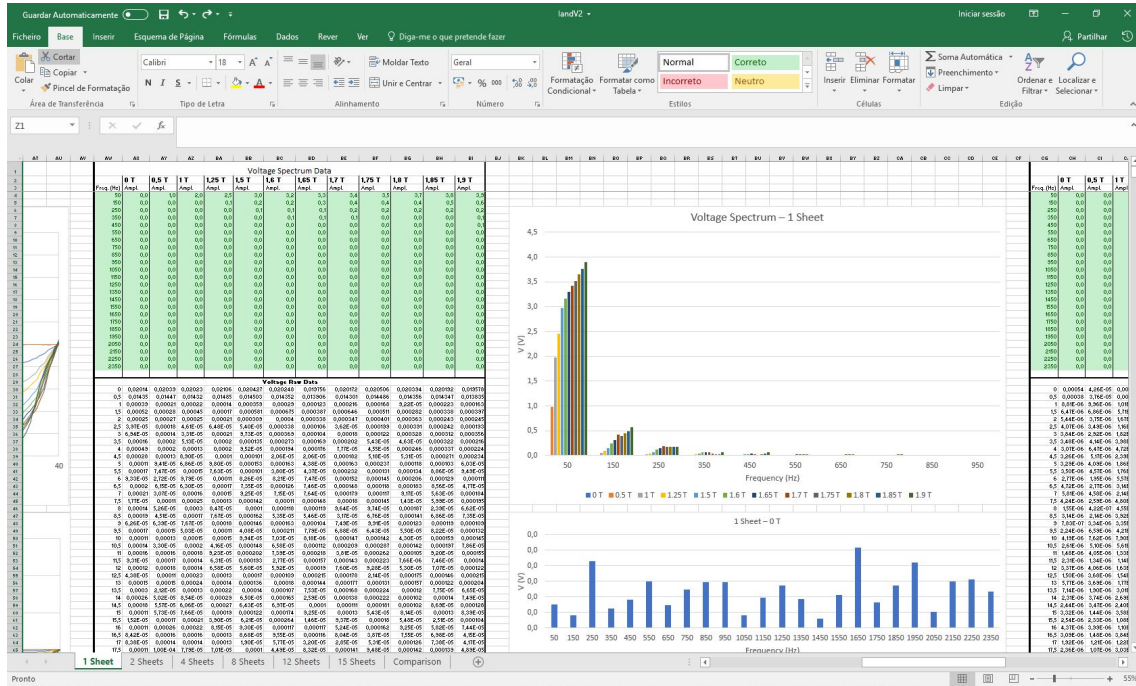


Figura 5.28: Secção da folha de cálculo onde são representados os espectros dos sinais de tensão medidos.

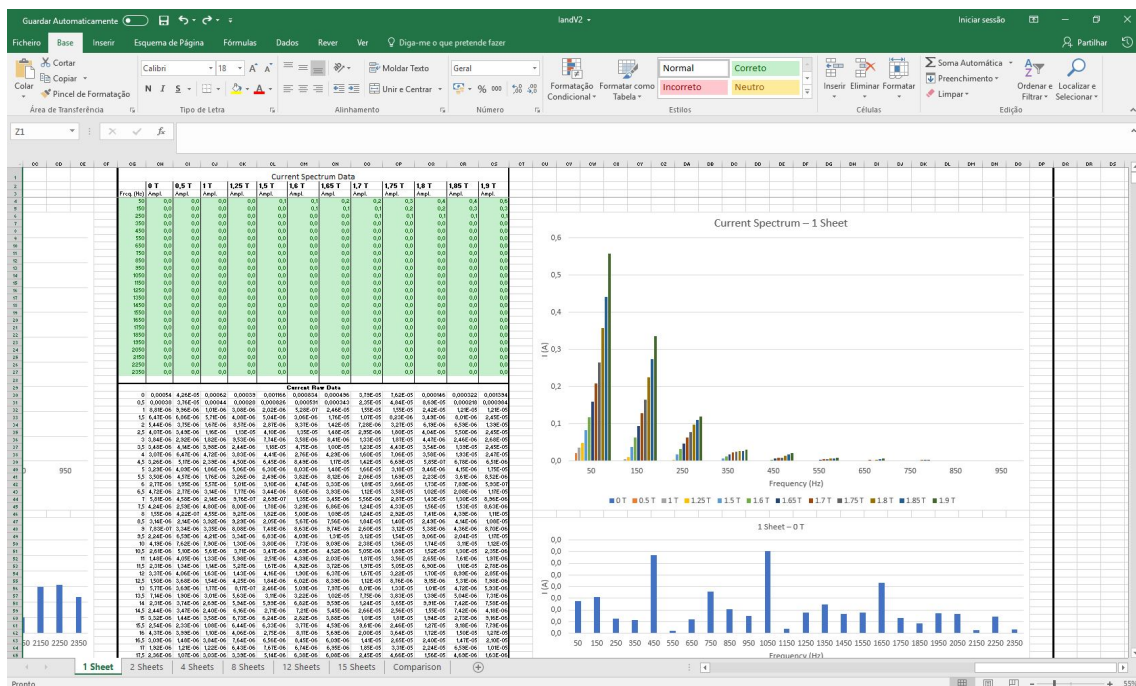


Figura 5.29: Secção da folha de cálculo onde são representados os espectros dos sinais de corrente medidos.

Ciclo de histerese

Foi ainda criado um ficheiro para análise dos ciclos de histerese dos ensaios nos vários níveis de indução. Na zona designada por *Raw data* devem ser introduzidos os dados

de indução magnética e de intensidade de campo magnético provenientes dos ficheiros gravados pela aplicação msLAB durante os ensaios. De seguida, devem ser selecionados intervalos desses dados e colados na zona colorida da folha para serem representados nos gráficos presentes na folha.

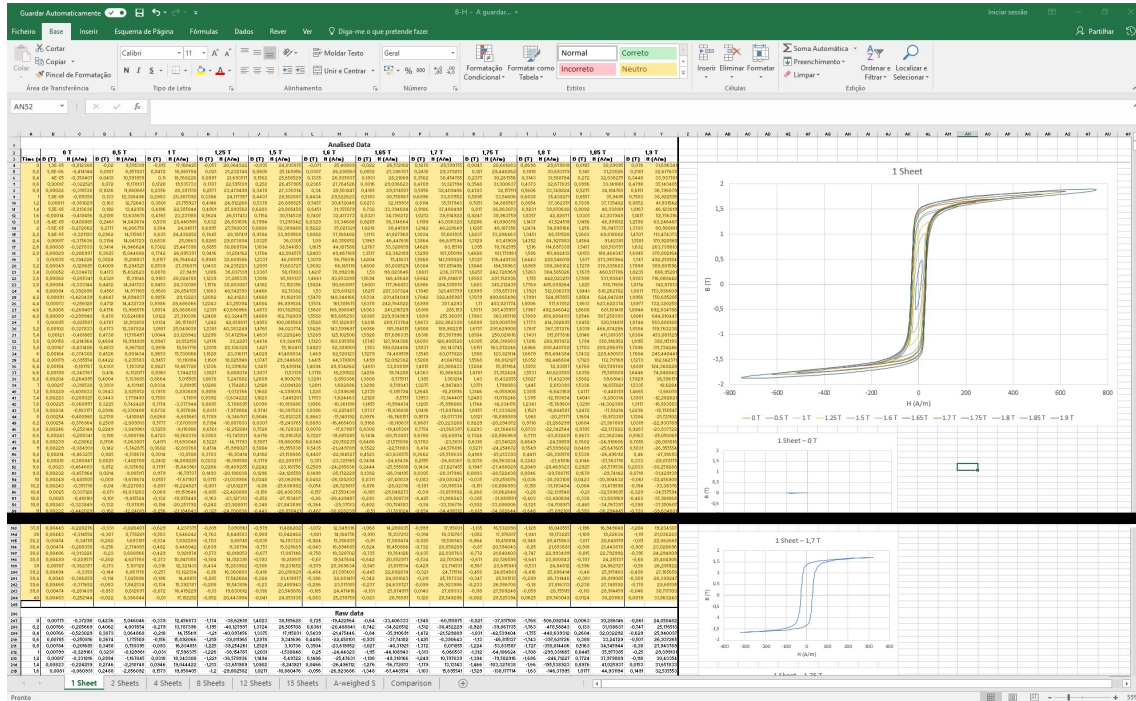


Figura 5.30: Folha de cálculo para análise dos ciclos de histerese.

TESTES E RESULTADOS

6.1 CONDIÇÕES DE TESTE E ENSAIO

6.2 RESULTADOS

6 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CONDIÇÕES DE TESTE E ENSAIO

Para caracterizar o comportamento magnetostritivo da chapa magnética PowerCore® H 105-30 fabricada pela Thyssenkrupp foram cortadas 60 chapas com 300 mm de comprimento e 30 mm de largura. Com elas, foram feitas medições com empilhamentos de 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas para averiguar quais as condições de teste que permitem obter resultados mais coerentes.

Registaram-se valores de corrente, tensão e magnetostricção nas direções da laminação da chapas e na transversal para cada um dos valores de polarização magnética da seguinte sequência: 0, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.8, 1.85 e 1.9 T.

Foi, ainda, avaliado o nível de ruído de acordo com o Anexo C Norma IEC TR 62581 (2010).

6.2 RESULTADOS

6.2.1 COMPORTAMENTO DA CORRENTE E DA TENSÃO

O sinal de tensão apresenta uma ligeira distorção harmónica, uma vez que o espectro tem frequências múltiplas da fundamental. Este tipo de deformação geralmente é imposta pela saturação da chapa magnética dos núcleos de dispositivos que apresentem uma relação não-linear entre tensão e corrente como, por exemplo, os transformadores. Na Figuras 6.1 e 6.2 estão representados os sinais de tensão e de corrente medidos com uma chapa a 1.75 T de indução magnética. Nos espectros desses sinais são visíveis as frequências múltiplas da fundamental responsáveis pelas distorções harmónicas (Figuras 6.3 e 6.4). Essas distorções harmónicas vão-se acentuando com o aumento da indução magnética, como se pode observar nas Figuras 6.5 e 6.6.

6.2.2 FILTRAGEM DOS SINAIS DE MAGNETOSTRICÇÃO

O sinal obtido nas medições apresentava uma grande quantidade de ruído. No gráfico da Figura 6.7 é possível ver-se que o sinal medido e no da Figura 6.8 a respetiva curva de borboleta, que é quase irreconhecível. Depois de passado pelos filtros que eliminaram as frequências que não as fundamentais da magnetostricção, o sinal e a curva de borboleta ganharam as formas representadas nas Figuras 6.9 e 6.10.

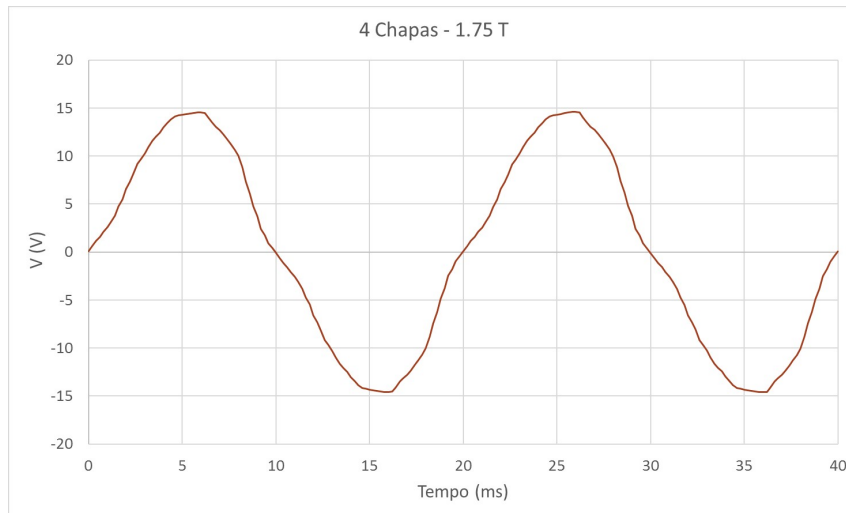


Figura 6.1: Excerto do sinal de tensão da medição com 4 Chapas a 1.75 T.

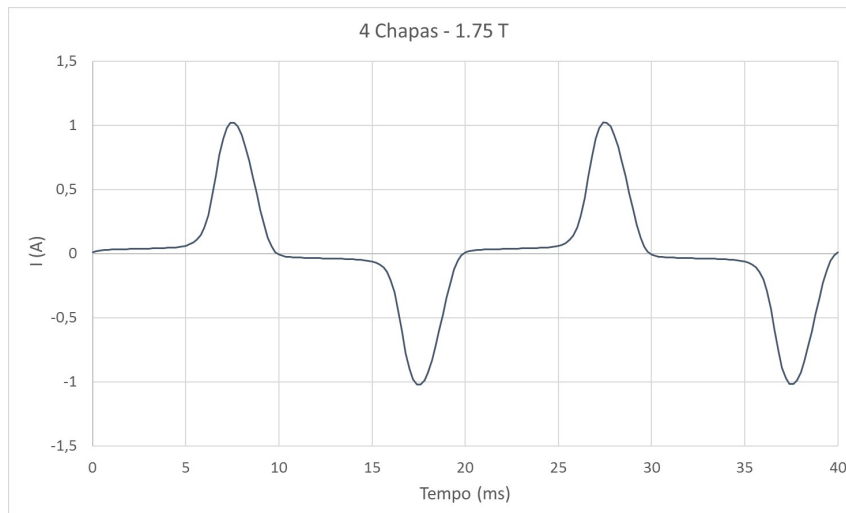


Figura 6.2: Excerto do sinal de corrente da medição com 4 Chapas a 1.75 T.

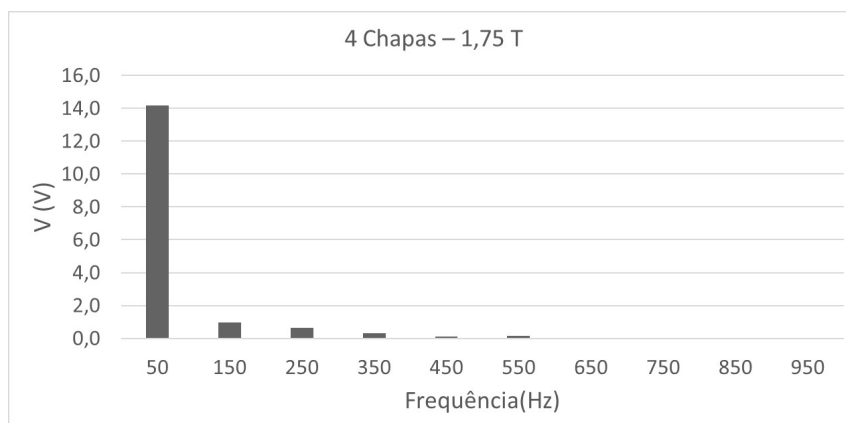


Figura 6.3: Espectro do sinal de tensão da medição com 4 Chapas a 1.75 T.

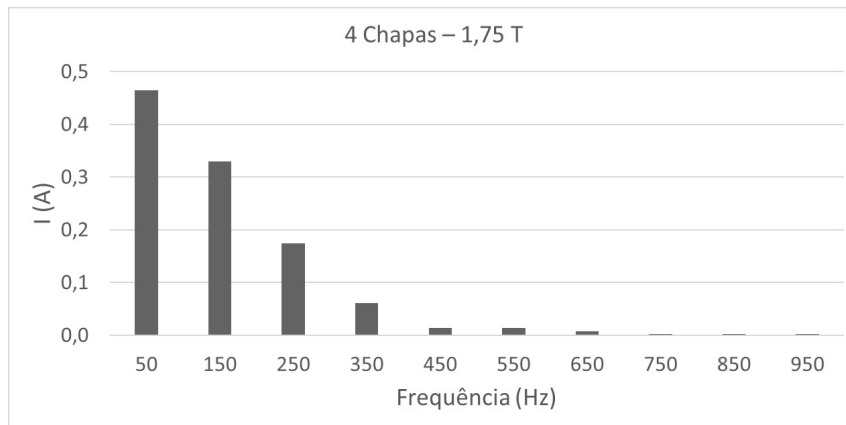


Figura 6.4: Espectro do sinal de corrente da medição com 4 Chapas a 1.75 T.

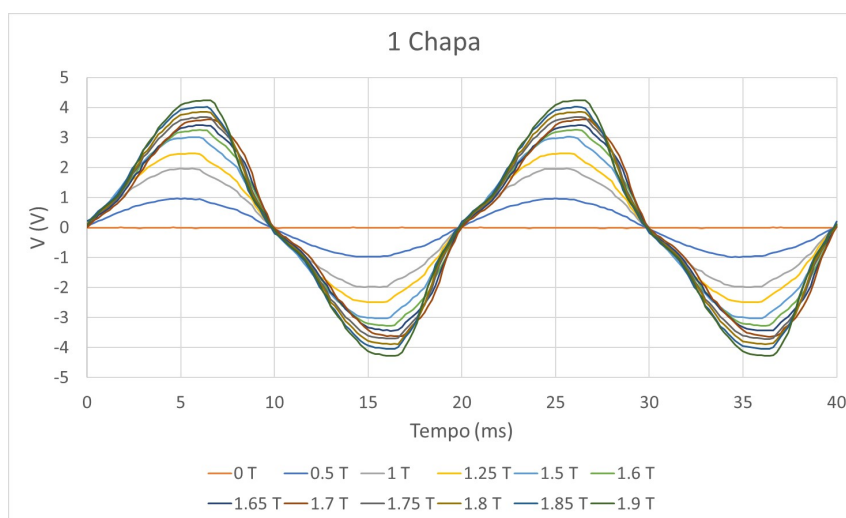


Figura 6.5: Exemplo da variação da tensão com o aumento da indução magnética (medição com 4 Chapas).

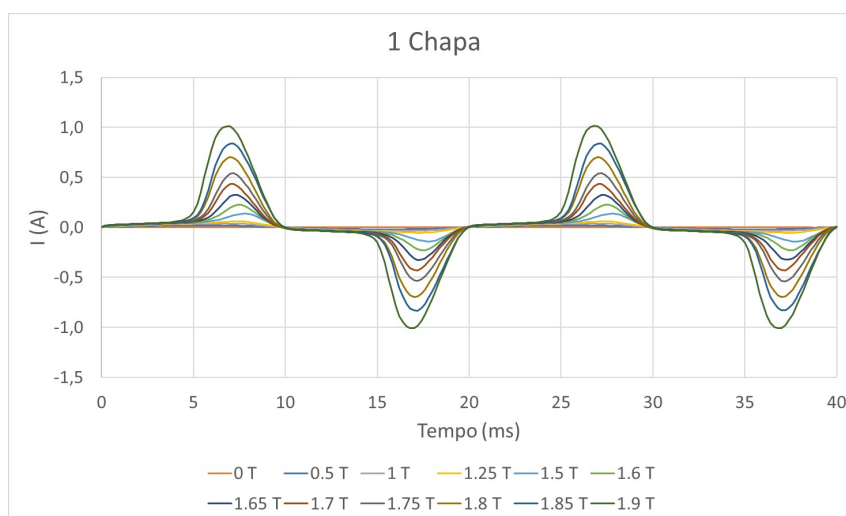


Figura 6.6: Exemplo da variação da corrente com o aumento da indução magnética (medição com 4 Chapas).

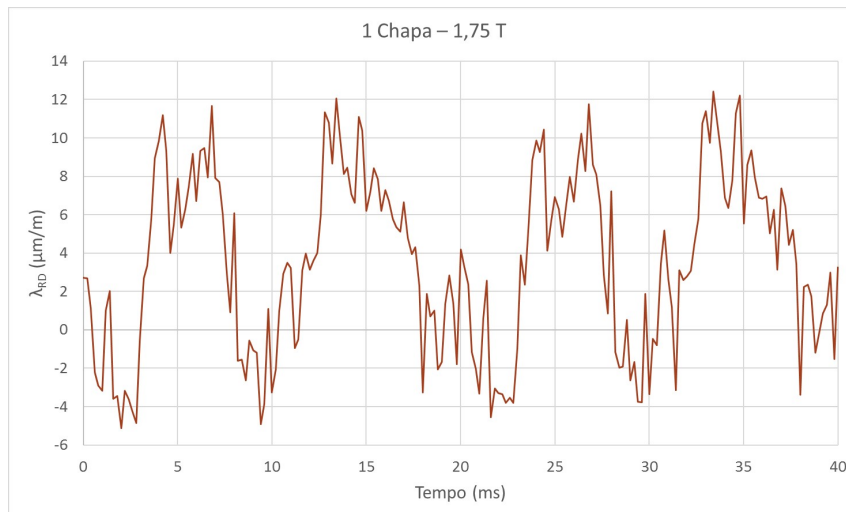


Figura 6.7: Exemplo de sinal de magnetostrição não-filtrado (medição com 1 Chapa a 1.75 T).

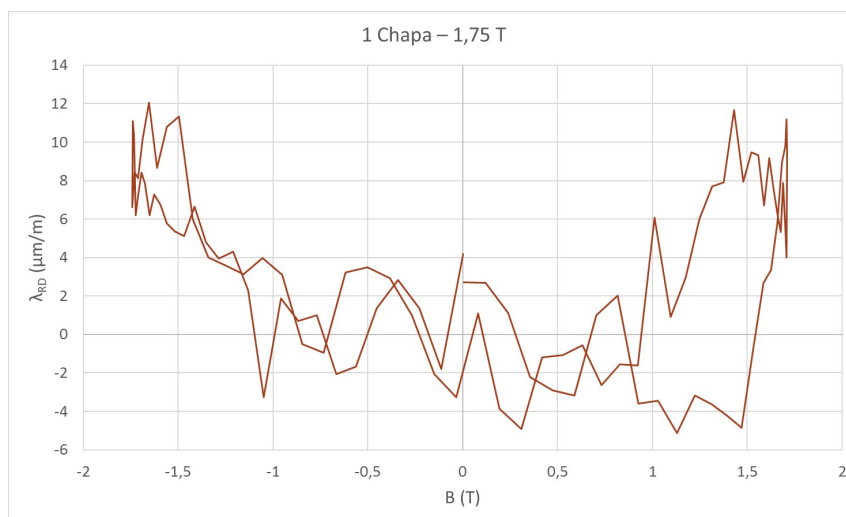


Figura 6.8: Exemplo de curva de borboleta traçada com o sinal de magnetostrição não-filtrado (medição com 1 Chapas a 1.75 T).

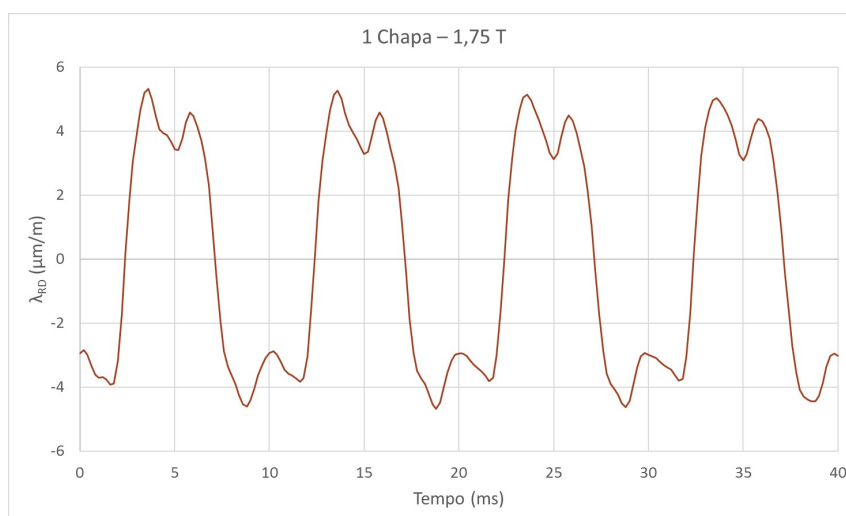


Figura 6.9: Exemplo de sinal de magnetostrição filtrado (medição com 1 Chapa a 1.75 T).

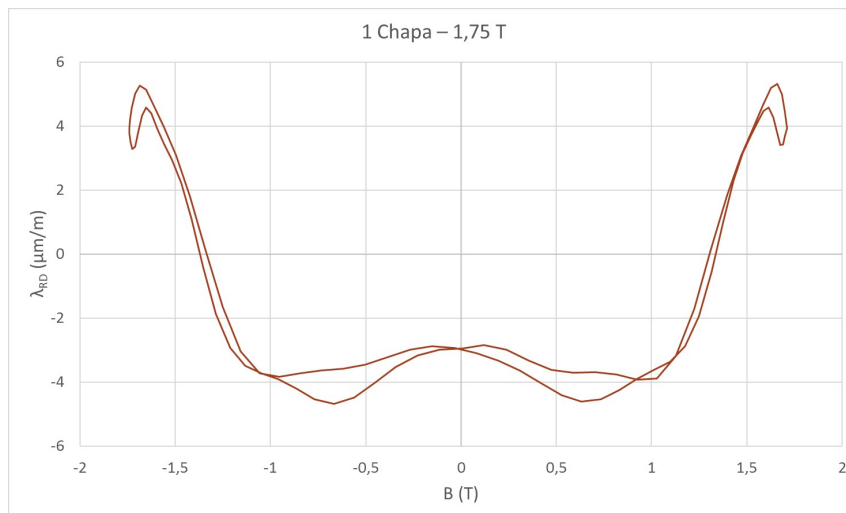


Figura 6.10: Exemplo de curva de borboleta traçada com o sinal de magnetostricção filtrado (medição com 1 Chapas a 1.75 T).

6.2.3 ACERTO DE FASE DOS SINAIS DE MAGNETOSTRICÇÃO E INDUÇÃO MAGNÉTICA

Durante as medições verificou-se que o sinal de magnetostricção obtido apresentava um atraso relativamente ao da indução (Figura 6.11). Caso não seja feito um acerto de fase dos sinais, as curvas de borboleta não cruzam a origem do referencial (Figura 6.10), como acontece nos exemplos apresentados nas normas IEC IEC60076-10-1 (2016) (Figura 6.12).

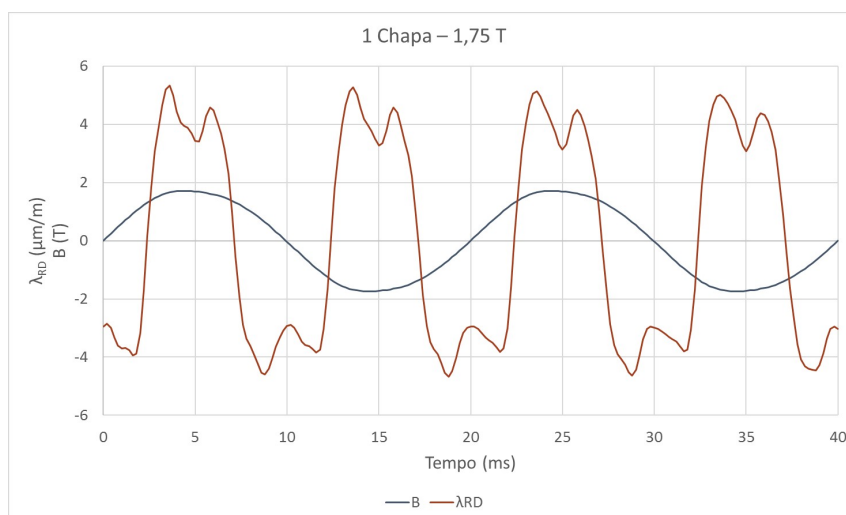


Figura 6.11: Indução e magnetostricção sem acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapas a 1.75 T).

Fazendo o acerto da fase do sinal de magnetostricção relativamente ao de indução magnética como é demonstrado na Figura 6.13, obtêm-se curvas de borboleta semelhantes às da Figura 6.14.

As curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da amostra são

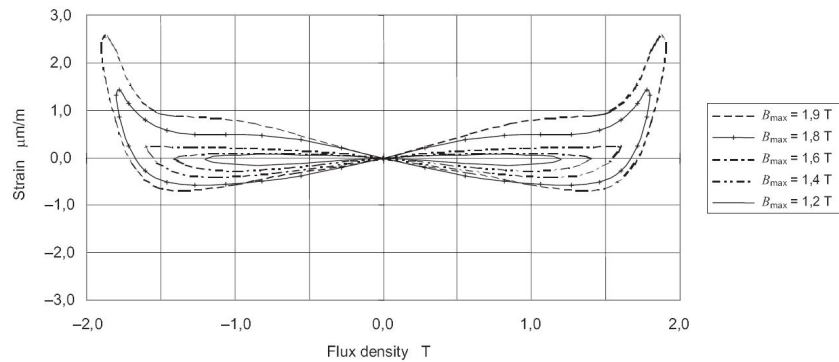


Figura 6.12: Exemplo de curvas de borboleta relativas à magnetostricção na direção da laminagem de um núcleo de aço elétrico para induções magnéticas máximas entre 1.2 e 1.9 T (IEC60076-10-1, 2016).

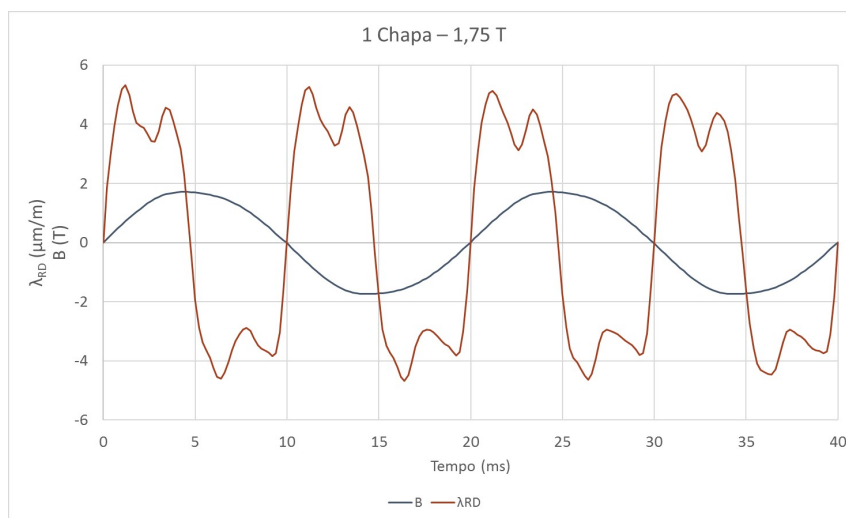


Figura 6.13: Indução e magnetostricção com acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapa a 1.75 T).

consideravelmente diferentes das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à mesma. Caso não seja feito o acerto de fase dos sinais de indução magnética e de magnetostricção, a curva de borboleta na direção de laminagem é aberta para cima, e na direção transversal à laminagem, é aberta para baixo.

6.2.4 DETERMINAÇÃO DO ENSAIO QUE MELHOR CARACTERIZA O COMPORTAMENTO DA CHAPA

Determinação dos valores de pico e pico-a-pico das curvas de borboleta

A magnetostricção de pico λ_{0-p} corresponde ao valor de magnetostricção no instante em que a polarização magnética é máxima.

Observando o gráfico da Figura 6.15 correspondente à λ_{0-p} na direção da laminagem, verifica-se que, apesar de alguma instabilidade, há um aumento exponencial nas gamas de indução mais elevadas (Figura 6.15). O inverso acontece na direção transversal à la-

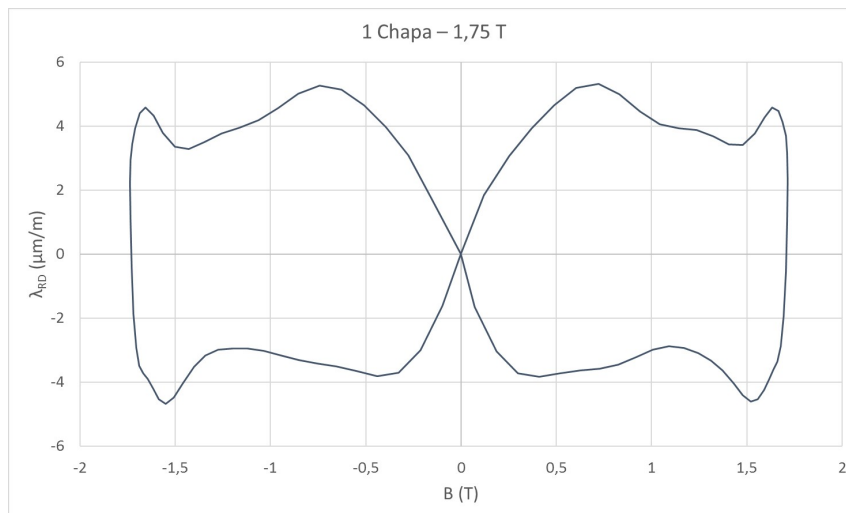


Figura 6.14: Exemplo de curva de borboleta com acerto da fase dos sinais (medição com 1 Chapa a 1.75 T).

minagem (Figura 6.16). Pode, concluir-se que as ensaios que geraram resultados mais previsíveis e uniformes foram os feitos com 1, 2 e 4 chapas.

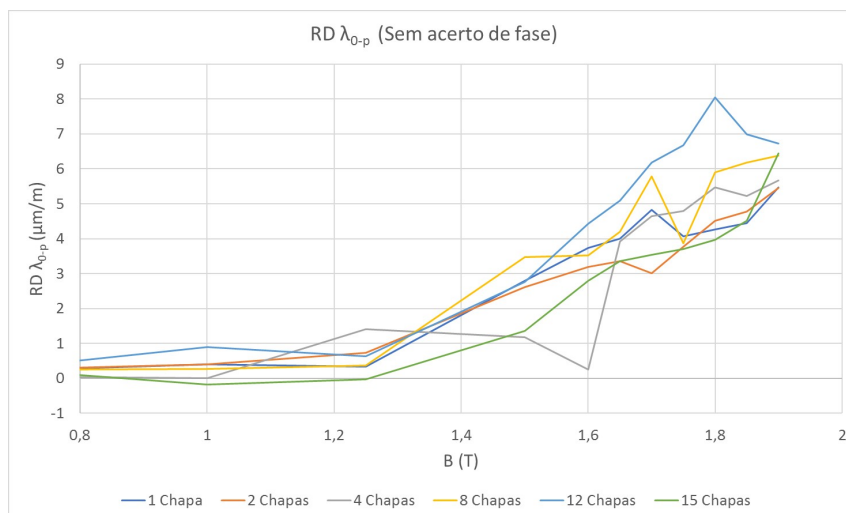


Figura 6.15: Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da chapa determinado sem as fases dos sinais acertada.

Analisando os gráficos das Figuras 6.17 e 6.18, pode concluir-se que há uma grande imprevisibilidade dos resultados nas gamas de indução mais altas e que não se verifica uma tendência quando comparadas as linhas relativas aos ensaios com diferentes números de chapas. Por isso, este parâmetro não se mostrou representativo.

A magnetostricção de pico-a-pico λ_{p-p} é a amplitude da magnetostricção num período de polarização.

Observando o gráfico da Figura 6.19 correspondente à λ_{p-p} na direção da laminação, verifica-se que as linhas correspondentes às medições com 12 e 15 chapas são as

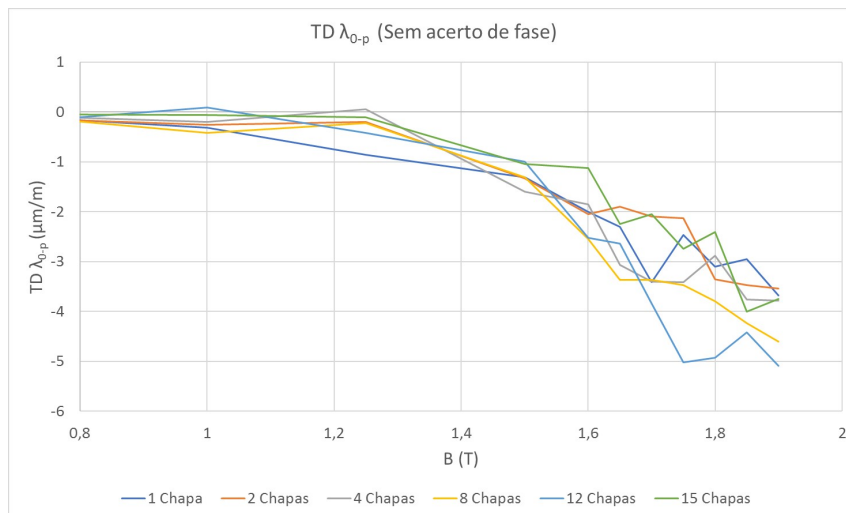


Figura 6.16: Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminação da chapa determinados sem as fases dos sinais acertadas.

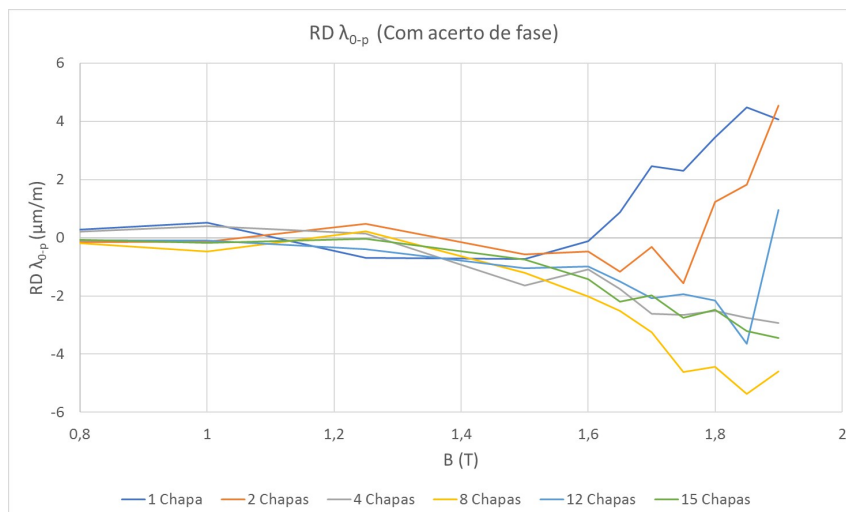


Figura 6.17: Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminação da chapa determinado com as fases dos sinais acertadas.

que mais se diferenciam das restantes. Relativamente à λ_{p-p} na direção transversal à laminação, as linhas que mais se diferenciam da tendência são as das medições com 8 e 12 chapas (Figura 6.20). Pode, por isso, concluir-se que os ensaios que geraram resultados mais previsíveis e uniformes foram os feitos com 1, 2 e 4 chapas.

Em ambos os gráficos de λ_{p-p} verifica-se há uma deformação residual medida de cerca de $1.5 \mu\text{m/m}$ quando a magnetização da chapa é nula ou muito baixa. Isso indica que os valores medidos podem ter uma incerteza dessa ordem de grandeza.

Pela análise dos gráficos das Figuras 6.15, 6.19, 6.16 e 6.20 é possível concluir-se que os ensaios com 1, 2 e 4 chapas apresentam os resultados mais representativos da tendência expectável.

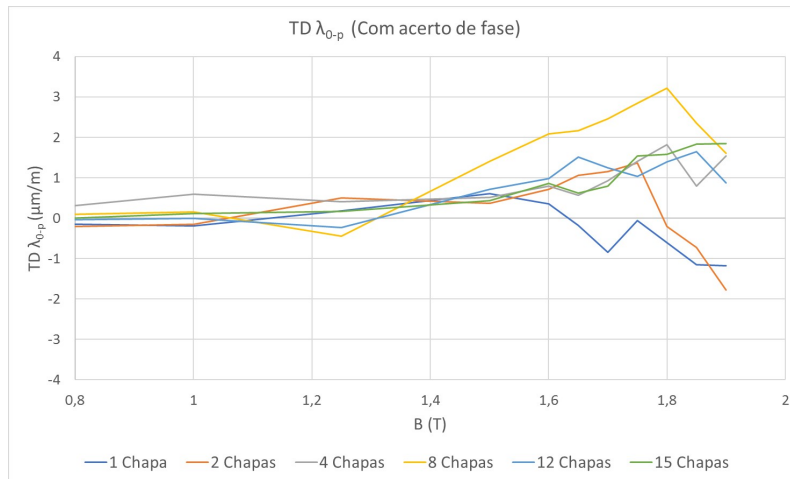


Figura 6.18: Valores de pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa determinados com as fases dos sinais acertadas.

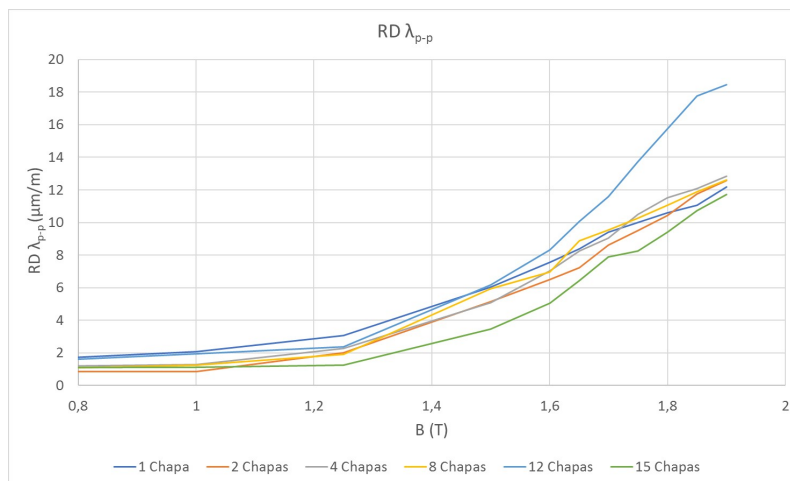


Figura 6.19: Valores de pico-a-pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção da laminagem da chapa.

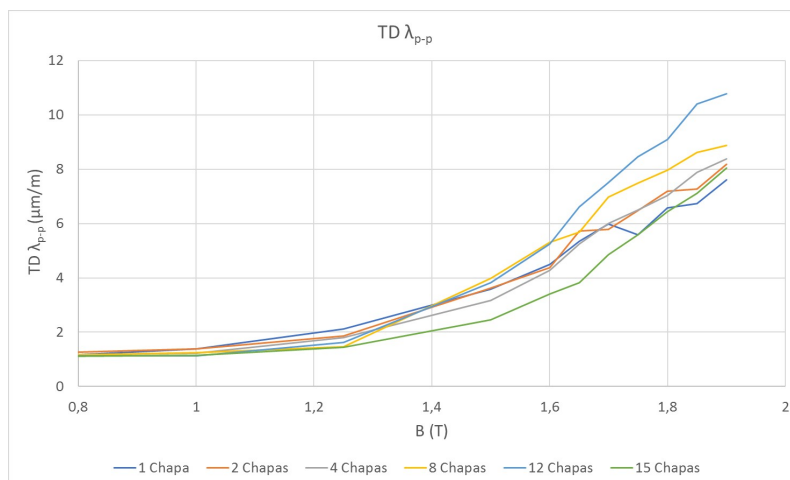


Figura 6.20: Valores de pico-a-pico das curvas de borboleta da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa.

Análise das curvas de borboleta da chapa

Nos gráficos das Figuras 6.21 e 6.22 são comparadas as curvas de borboleta relativas aos vários números de chapas testados para vários valores de indução medidos. Analisando as curvas pode concluir-se que os ensaios com 12 chapas apresentam uma maior magnitude de magnetostrição. Os de 15 chapas têm a menor magnitude, especialmente nas induções mais baixas. As curvas de borboleta das medições com 8 chapas tem uma forma distinta das restantes, especialmente nas induções mais baixas. De uma maneira geral, pode dizer-se as curvas tendem a ser mais uniformes nas gamas de indução mais altas.

Através da análise dos gráficos considerou-se que as medições realizadas com 4 chapas seriam as mais adequadas para caracterização da chapa, uma vez que as curvas de borboleta relativas a esse ensaio são as que têm um comportamento mais tendencial, quando comparadas com o conjunto das restantes nos vários níveis de indução.

Análise dos espectros

Os espectros relativos aos valores de magnetostrição na direção da laminagem da chapa com 1.5 T de magnetização obtidos nos vários ensaios estão representados no gráfico da Figura 6.23. Analisando o espectro, verifica-se que o ensaio com 15 chapas apresenta, para a frequência fundamental da magnetostrição, uma deformação 3 vezes inferior aos restantes e que a componente a 200 Hz da deformação do ensaio com 8 chapas é muito superior à dos demais. A 300 Hz, são os ensaios com 1 e 2 chapas que têm uma magnitude muito inferior relativamente aos outros. Relativamente à magnetostrição na direção transversal à laminagem, não se verificam grandes variações entre os ensaios com diferentes números de chapas, excetuando as componentes a 200 e 300 Hz do ensaio com 8 chapas (Figura 6.24). Pode, portanto, concluir-se que neste caso são os ensaios com 4 e 12 chapas que têm um comportamento mais representativo.

No gráfico da Figura 6.25 e Figura 6.26 estão os espectros dos ensaios a 1.75T de magnetização, relativos a ambas as direções analisadas. Na direção da laminagem, o primeiro e o terceiro harmónicos os ensaios com 1, 2 e 4 chapas são os que apresentam resultados mais semelhantes entre si. Na direção transversal à laminagem, os valores da frequência fundamental relativos aos ensaios com 12 e 15 chapas diferenciam-se bastante dos restantes; a 200 Hz há grandes diferenças entre os vários ensaios que não se verificam nas demais frequências. Por isso, tal como na situação anterior, é o ensaio com 4 chapas que aparenta resultados mais de acordo com a média dos restantes.

A 1.9T de indução magnética na direção da laminagem, as diferenças de magnitude das componentes da magnetostrição nas diversas frequências não são tão notórias como as enunciadas anteriormente relativas aos gráficos das medições feitas a induções mais baixas. As únicas exceções são a componente a 100 Hz do ensaio com 12 chapas e as componentes a 200 e 300 Hz do ensaio com 8 chapas (Figura 6.27). Na direção transversal à laminagem, verifica-se que a componente a 100 Hz do ensaio com 12 chapas é muito maior que a dos restantes, tal como acontecia no gráfico anterior (Figura 6.28).

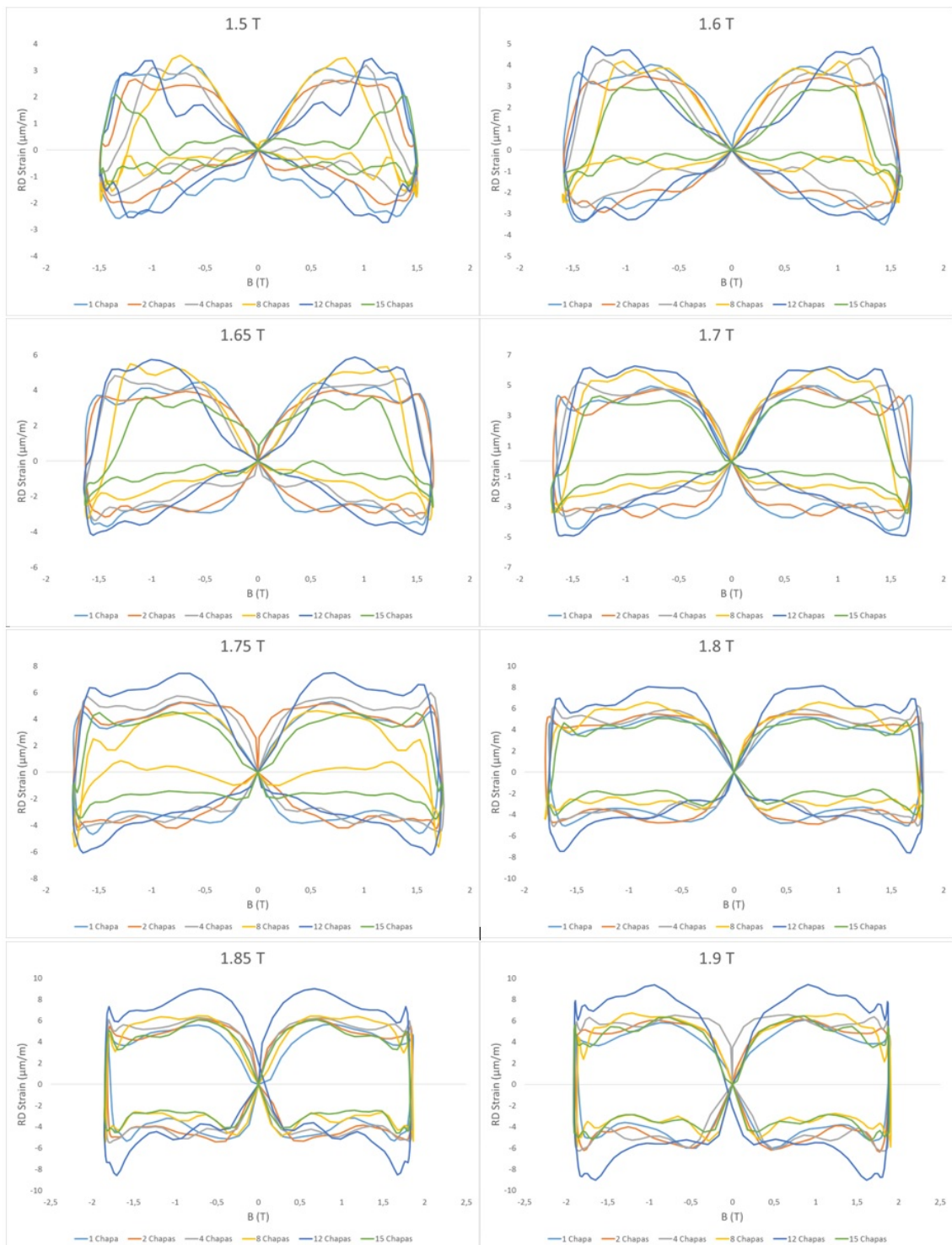


Figura 6.21: Curvas de borboleta na direção da laminagem das medições a 1.5, 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.8 e 1.85 e 1.9 T de indução magnética.

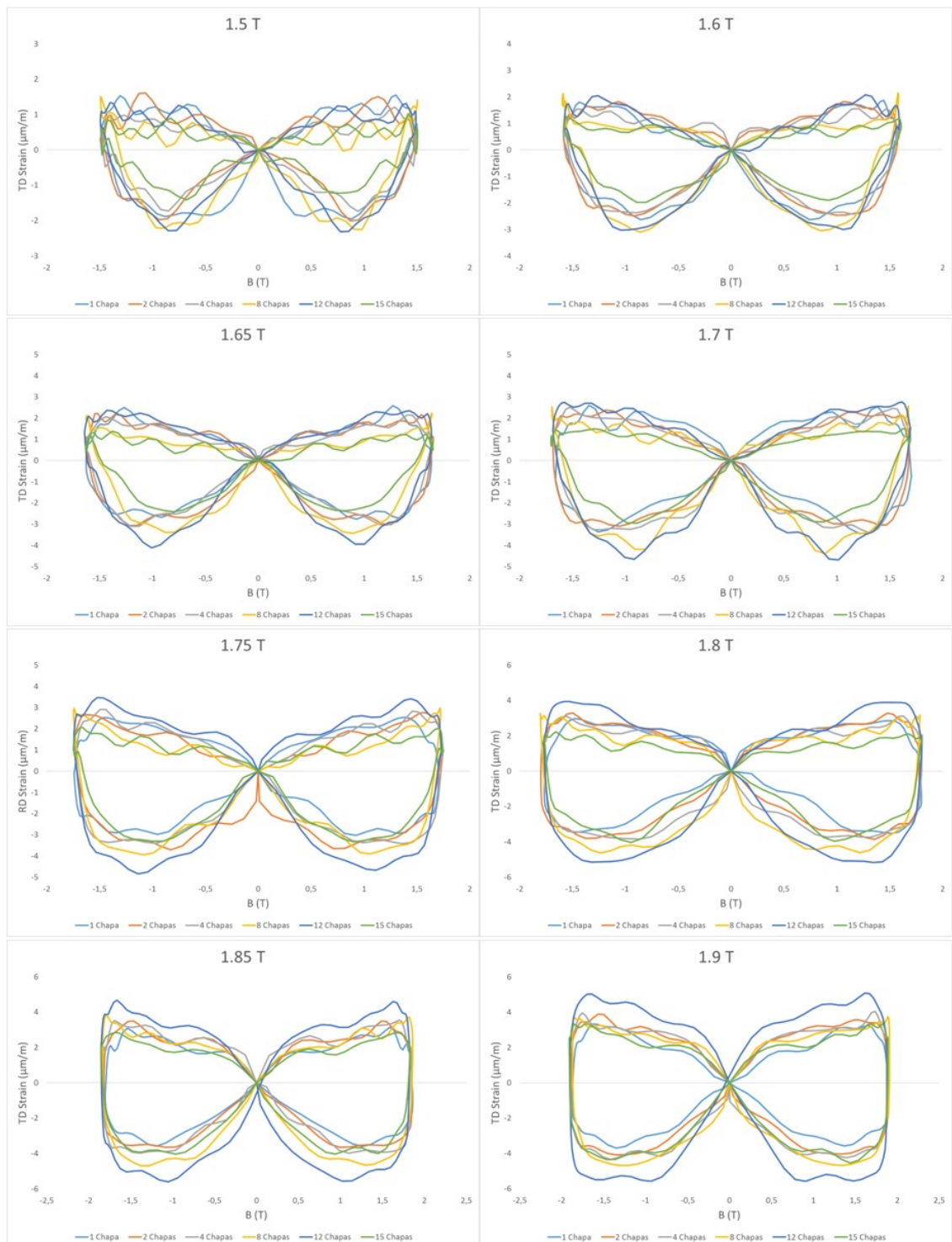


Figura 6.22: Curvas de borboleta na direção da laminagem das medições a 1.5, 1.6, 1.65, 1.7, 1.75, 1.8 e 1.85 e 1.9 T de indução magnética.

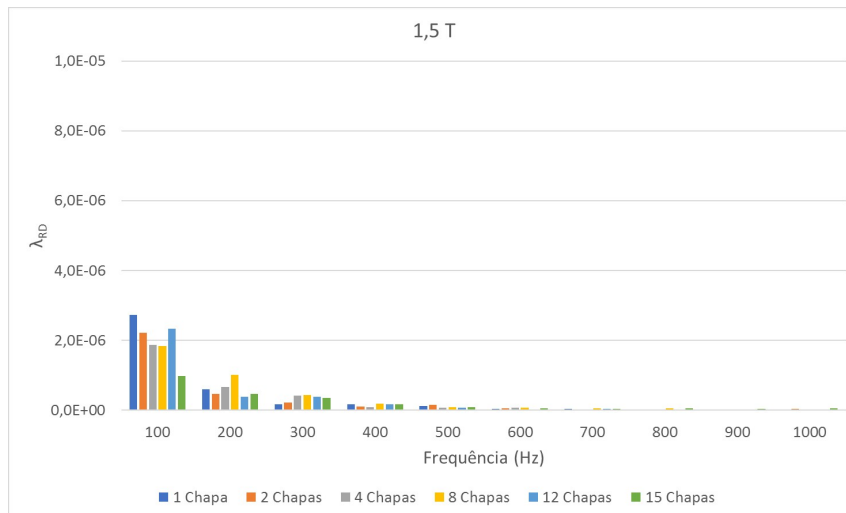


Figura 6.23: Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.5T.

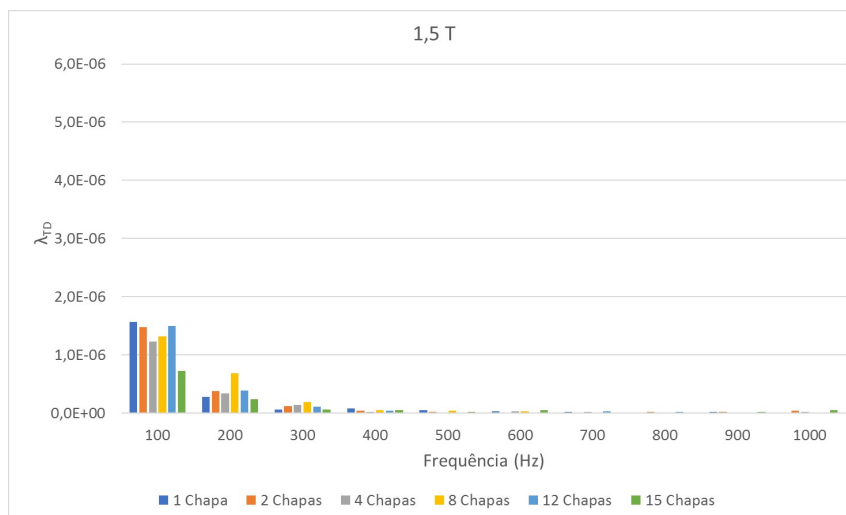


Figura 6.24: Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.5T.

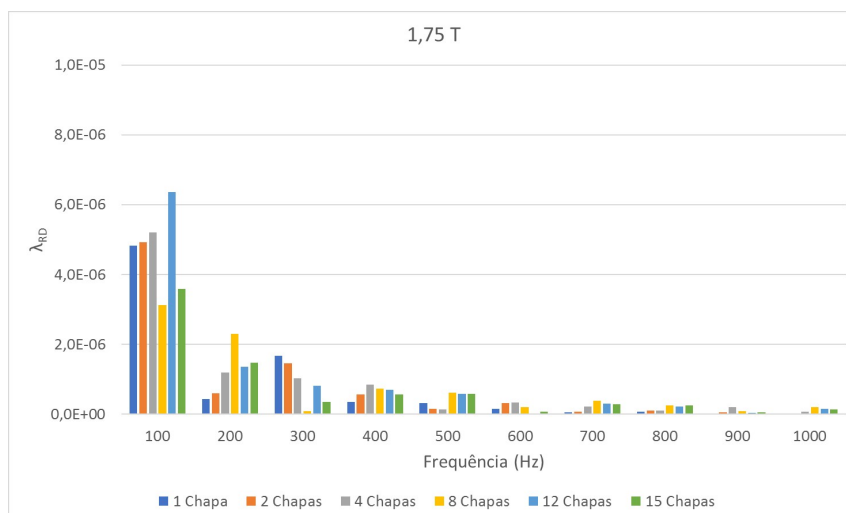


Figura 6.25: Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.75T.

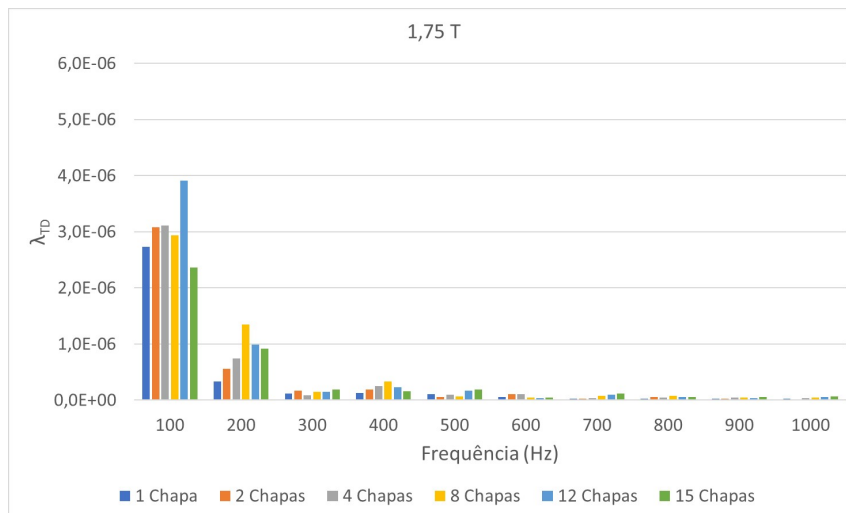


Figura 6.26: Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.75T.

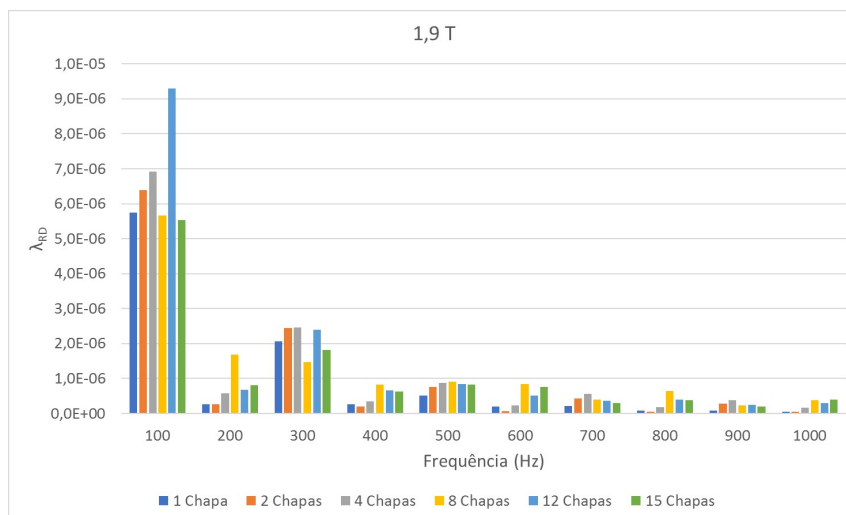


Figura 6.27: Espectros da magnetostricção na direção da laminagem da chapa 1.9T.

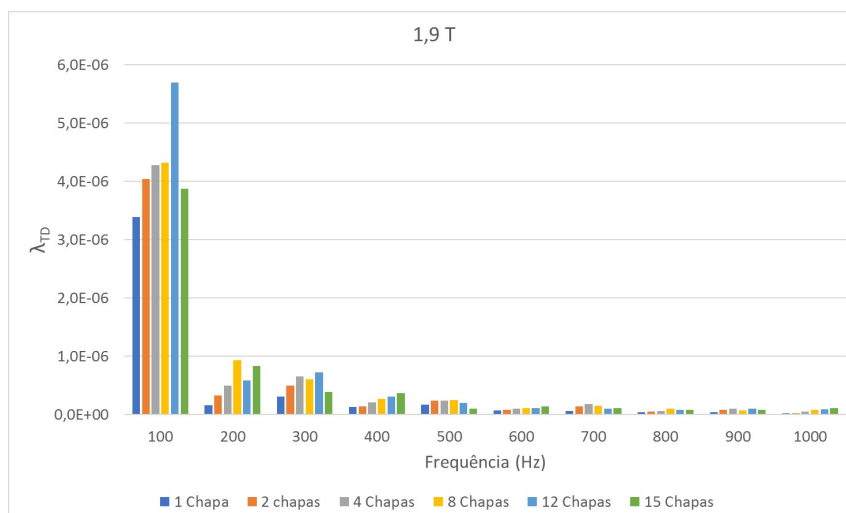


Figura 6.28: Espectros da magnetostricção na direção transversal à laminagem da chapa 1.9T.

6.2.5 ACELERAÇÃO E VELOCIDADE CARACTERÍSTICAS DA MAGNETOSTRIÇÃO DE PONDERAÇÃO A

As curvas de aceleração característica da magnetostricção de ponderação A relativas à direção da laminagem e transversal à laminagem estão representadas nos gráficos das Figuras 6.29 e 6.30. Foram contabilizadas as componentes com frequência múltiplas de 100 e inferiores a 1000 Hz. Como seria de esperar, verifica-se que há uma subida dos valores de ruído nas frequências mais altas. As mesmas conclusões podem ser tiradas dos resultados dos níveis de velocidade da magnetostricção de ponderação A representados nos gráficos das Figuras 6.31 e 6.32.

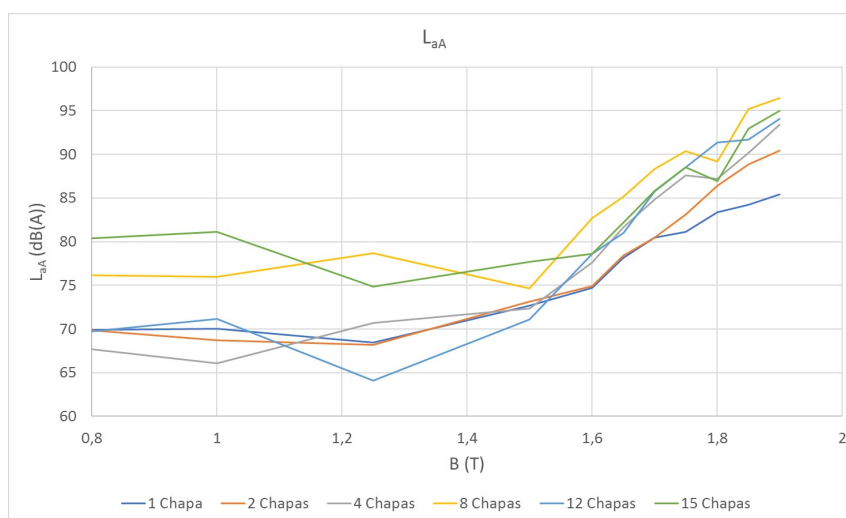


Figura 6.29: Níveis de aceleração da magnetostricção de ponderação A na direção da laminagem.

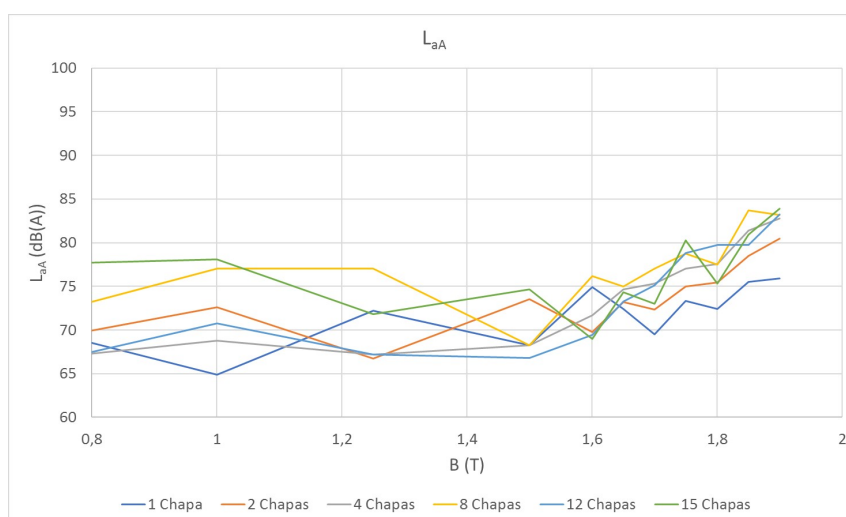


Figura 6.30: Níveis de aceleração da magnetostricção de ponderação A na direção transversal à laminagem.

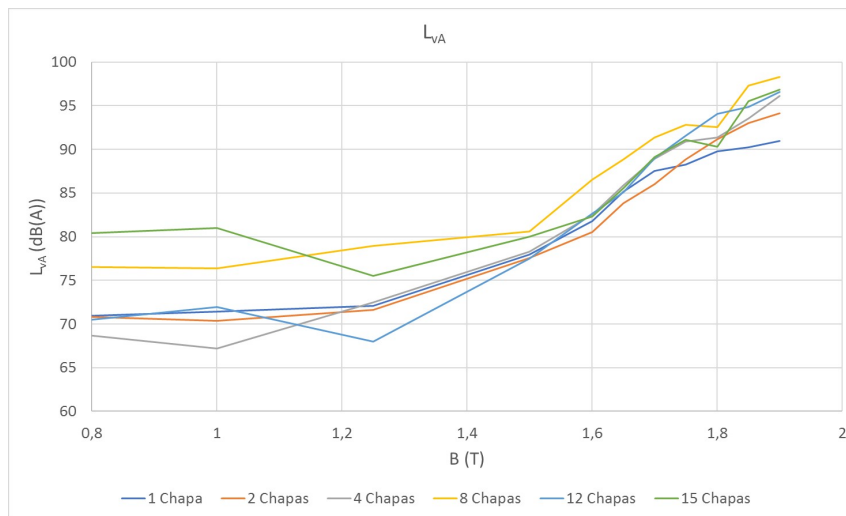


Figura 6.31: Níveis de velocidade da magnetostrição de ponderação A na direção da laminagem.

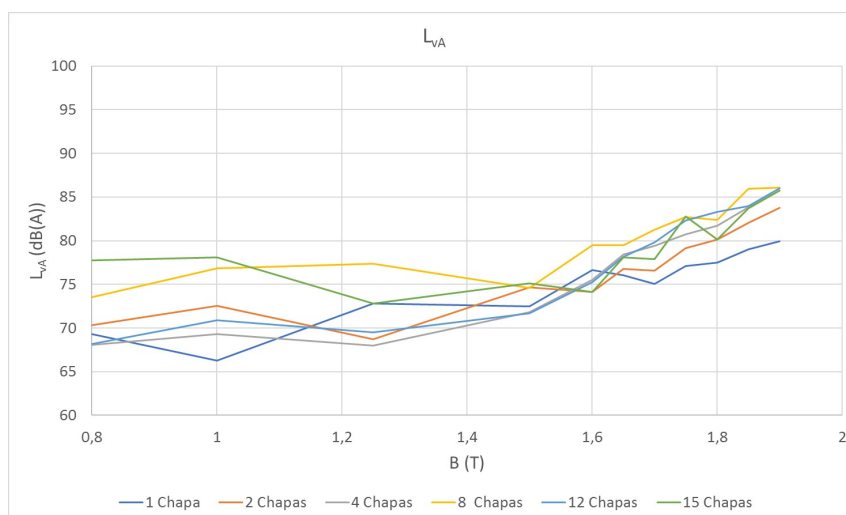


Figura 6.32: Níveis de velocidade da magnetostrição de ponderação A na direção transversal à laminagem.

CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7 CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

A bibliografia revista durante a realização do presente trabalho demonstra que o problema da magnetostrição em máquinas elétricas é ainda um tema controverso. Muitos investigadores tentaram e continuam a tentar dar respostas às questões relacionadas com o impacto que a magnetostrição tem nas vibrações e ruído dos transformadores de potência. O modelo e os métodos para caracterizar a magnetostrição varia de autor para autor e as diferenças de resultados são demasiado grandes para se tirarem conclusões definitivas.

Neste trabalho, foi inicialmente feito um levantamento de informação sobre transformadores, materiais magnéticos e magnetostrição para reunir uma boa base de conhecimento para abordar o problema proposto. Foi, também, reunida informação sobre os dispositivos de medição de propriedades magnéticas e vários tipos de transdutores adequados.

Foi feito um levantamento dos tipos de chapa magnética tipicamente utilizados pela EFACEC e das respetivas propriedades e do equipamento disponível na empresa para fazer os ensaios.

Fez-se uma análise metalográfica a um desses tipos de chapa e, com isso, pode concluir-se que o processo de preparação de amostras deste tipo de chapa é relativamente difícil. Não se conseguiu uma superfície livre de riscos durante o polimento devido ao facto de o material ser bastante abrasivo. O ataque químico também levou mais tempo e requereu uma substância com uma maior concentração do que seria previsível. Apesar disso, foi possível identificar-se o tamanho e a forma do grão e ver que as fronteiras de grão eram menos perceptíveis na direção da laminagem e que os grãos tendiam a ser mais compridos nessa direção.

O sistema composto pela ponte de Epstein com um extensómetro colado numa das chapas revelou-se capaz de medir magnetostrição, ainda que com muito ruído. Esse ruído foi maioritariamente eliminado através de filtros que deixavam passar apenas as frequências múltiplas da fundamental da magnetostrição e foi possível traçar curvas de borboleta relativamente bem definidas, representativas do material e com a tendência expectável.

A aplicação desenvolvida em LabVIEW revelou-se uma ferramenta muito útil, intuitiva e economizadora de tempo na aquisição, filtragem e gravação dos dados das medições, onde com relativa facilidade se consegue desenvolver aplicações de software com instrumentos virtuais para aquisição e análise de dados avançada, em perfeita conjugação com o hardware de aquisição.

Os valores absolutos de magnetostrição na direção transversal são menores que os valores absolutos na direção longitudinal. Analisando as curvas de borboleta é perceptível que elas têm uma forma adequada, comparativamente com o que foi encontrado na lite-

ratura. Na direção da laminagem, as curvas de borboleta da magnetostricção da amostra são consideravelmente diferentes das relativas à direção transversal. Na direção da laminagem, a magnetostricção positiva é maior do que a negativa e na transversal verifica-se o inverso. Caso não seja feito o acerto de fase dos sinais de indução magnética e de magnetostricção, a curva de borboleta da direção da laminagem está orientada para cima e a da transversal para baixo.

A tentativa de relacionar a quantidade de chapa magnética com a magnetostricção produzida teve algum sucesso. Os ensaios realizados com menos chapas apresentam resultados com menores variações e, por isso, aparentam ser mais adequados para caracterizar o comportamento magnetostritivo da chapa.

Apesar de alguns dos resultados não serem totalmente esclarecedores, neste trabalho foi reunida uma grande quantidade de informação e obtida experiência muito importante que servirá de plataforma para a continuação do estudo e caracterização experimental da magnetostricção de chapa magnética.

7.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

O caminho para a previsão do nível de ruído provocado pela magnetostricção em transformadores é longo e complexo. O primeiro passo para a continuação deste trabalho deverá ser a repetição dos ensaios realizados para confirmar a repetibilidade e a consistência do que foi conseguido até agora. Atendendo a que os resultados mais coesos foram conseguidos nos ensaios com menos chapas, seria interessante que fosse incluído um teste com 3 chapas futuramente e que fossem testadas mais amostras do mesmo e de outros tipos de chapa.

Foi criado um plano de testes que poderá ser usado como guia para a continuação do estudo do problema que se encontra no Apêndice B. Inicialmente deverão ser feitos vários ensaios para averiguar a adaptabilidade dos vários tipos de instrumentação existentes que possam ser adequados às medições de magnetostricção nos tipos de chapa utilizados pela EFACEC. De seguida, deverão ser averiguadas as variações de resultados com diferentes tipos de chapa e espessuras. A influencia da utilização de distintos processos de corte da chapa, tais como, o corte a laser ou a jato de água, e de fatores externos à chapa como, por exemplo, tensões mecânicas ou o efeito da temperatura também deve ser estudada. Paralelamente, seria interessante confirmar alguns dos resultados que vão sendo obtidos nos ensaios feitos na ponte de Epstein noutro dispositivo de medição para determinação das características magnéticas de materiais, tal como o *Single Sheet Tester*.

Executar uma análise metalográfica a outros tipos de chapa também é desejável para averiguar quais as diferenças detetáveis e tentar relacioná-las com os resultados obtidos nas medições de magnetostricção.

A fase final do estudo será aplicar os conhecimentos adquiridos nos ensaios realizados alterando o projeto e/ou processo de fabrico de transformadores e fazer testes de ruído para determinar a magnitude das diferenças conseguidas.

BIBLIOGRAFIA

8 BIBLIOGRAFIA

ABB (2004). *Transformer Handbook*. ABB.

AK Steel (2017). Selection of electrical steels for magnetic cores.

Anderson, P. (1996). Evaluation of magnetostriction measurement techniques. Master's thesis, University of Wales, United Kingdom.

Anderson, P. (2000). *A novel method of measurement and characterisation of magnetostriction in electrical steels*. PhD thesis, Cardiff University.

Anderson, P. (2008). Measurement of the stress sensitivity of magnetostriction in electrical steels under distorted waveform conditions. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(20):583 – 588.

Antonelli, E., Cardelli, E., and Faba, A. (2005). Epstein frame: How and when it can be really representative about the magnetic behavior of laminated magnetic steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5):1516 – 1519.

Araújo, F. M. (2000). *Redes de Bragg em Fibra Óptica*. PhD thesis, Universidade do Porto, Portugal.

Baldwin, C. T. (1973). *Fundamentals of Electrical Instruments*. Harrap, 2nd edition.

Bardell, P. R. and Moro, M. A. (1970). *Los Materiales Magnéticos en la Industria Eléctrica*. Ediciones Urmo, Bilbao, Spain.

Belahcen, A. (2004). *Magnetoelasticity, Magnetic Forces and Magnetostriction in Electrical Machines*. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Finland.

Bertotti, G. (1998). *Hysteresis in Magnetism*. Academic Press, San Diego, CA.

Birss, R. R., Keeler, G. J., Pearson, P., and Potton, R. J. (1978). A capacitive instrument for the measurement of a large range of magnetostriction at low temperatures and high magnetic fields. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 11(9):928 – 934.

Clark, A. E. (1980). *Handbook of Ferromagnetic Materials*, volume 1. Elsevier.

Cullity, B. D. and Graham, C. D. (2009). *Introduction to Magnetic Materials*. John Wiley and Sons.

Daou, R., Weickert, F., Nicklas, M., Steglich, F., Haase, A., and Doerr, M. (2010). High resolution magnetostriction measurements in pulsed magnetic fields using fiber bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*, 81(3):033909.

Dasgupta, I. (2009). *Power Transformers - Quality Assurance*. New Age International Publishers, New Delhi, India.

- Dickinson, M. (2010). Onan or onaf, what is the difference? Website. Data da consulta: 02/01/2017 <http://ezinearticles.com/?ONAN-Or-ONAF,-What-Is-the-Difference?id=5229489>.
- electrical4u (2009). Linear variable differential transformer (lvdt). autor n.d., Data da consulta: 02/10/2016, <http://www.electrical4u.com/linear-variable-differential-transformer/>.
- EN10027-1 (2005). Designation systems for steels - part 1: Steel names. Technical report, European Committee for Standardization.
- Ertl, M. and Voss, S. (2014). The role of load harmonics in audible noise of electrical transformers. *Journal of Sound and Vibration*, 333(8).
- Ferreira, L., Araújo, F., Maia, A., Alves, P., and Santos, J., editors (2004). *Redes de Bragg em Fibra Óptica – Contribuições para o Desenvolvimento de uma Tecnologia Revolucionária em Monitorização Estrutural*, Encontro Nacional Betão Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Fujita, A. and Fukamichi, K. (1999). Giant volume magnetostriction due to the itinerant electron metamagnetic transition in La(Fe-Si)₁₃ compounds. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5):3796 – 3801.
- George, R. (1931). Power transformer noise: Its characteristics and reduction. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 50(1):347 – 353.
- George, W. R., Holt, C., and Thompson, J. E. (1962). Magnetostriction in grain-oriented silicon-iron. *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*, 109(43):101 – 108.
- Gomes, J. S. and Vaz, M. A. (1999). Análise experimental de tensões. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Gong, W., Zhang, Z., Hou, R., Lin, A., Xu, Z., He, J., Fan, W., and J., W. (2015). Stress dependence of magnetostriction and magnetic properties in electrical steel. *Advanced Materials Research*, 1089(5):97 – 101.
- Hasenzagl, A., Weiser, B., and Pfützner, H. (1996). Novel 3-phase excited single sheet tester for rotational magnetization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160:180 – 182.
- Healthcote, M. J. (1996). *The J & P Transformer Book*. Wiley, 13th edition.
- Heck, C. (1974). *Magnetic Materials and Their Applications*. Butterworth-Heinemann, London, United Kingdom.
- IEC TR 62581 (2010). Electrical steel – methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens. Technical report, International Electrotechnical Commission.
- IEC60076-10-1 (2016). Power transformers - part 10: Determination of sound levels. Technical report, International Electrotechnical Commission, United Kingdom.

- IEC60404-2 (2008). Magnetic materials – part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame. Technical report, International Electrotechnical Commission.
- Inagaki, K., Kuwabara, M., Sato, K., Fukui, K., Nakajima, S., and Azuma, D. (2011). Amorphous transformer contributing to global environmental protection. *Hitachi Review*, 60(5):250 – 256.
- Inoue, H. and Okabe, S. (2014). Magnetic properties of grain oriented electrical steel in model transformer under direct current-biased magnetization. *Journal of Applied Physics*, 115(17):332 – 341.
- IS 649 (1997). Methods for testing steel sheets for magnetic circuits of power electrical apparatus. Technical report, Bureau of Indian Standards.
- kaltenbacher, M., Volk, A., and Ert, M. (2013). Anisotropic model for the numerical computation of magnetostriction in grain-oriented electrical steel sheets. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 32(5):1620 – 1630.
- Klimczyk, P. (2012). *Novel Techniques for Characterisation and Control of Magnetostriction in G.O.S.S.* PhD thesis, Cardiff University.
- Klimczyk, P., Moses, A., Anderson, P., and Davies, M. (2009). Challenges in magnetostriction measurements under stress. *Przegląd Elektrotechniczny*, 85(3):100 – 102.
- Kulkarni, S. and Khaparde, S. (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice*. Marcel Dekker.
- Lemaitre, R. and Belgrand, T., editors (2012). *TKES Research & Technology Development*.
- Masti, R. S., Desmet, W., and Heylen, W. (2004). On the influence of core laminations upon power transformer noise. *K.U. Leuven, Department of Mechanical Engineering, Belgium*.
- Matheisel, Z. (1973). *Blachy elektrotechniczne walcowane na zimno*. PhD thesis, WNT, Warsaw, Poland.
- McLyman, W. T. (2004). *Transformer and Inductor Design Handbook*. Marcel Dekker.
- Moira, J. F. (2003). *Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill, Madrid, Spain, 5th edition.
- Moses, A. J. (1990). Electrical steels: past, present and future developments. *IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education*, 137(5):233 – 245.
- Moskowitz, B. M. (1991). Classes of magnetic materials. Environmental Magnetism Workshop, Institute for Rock Magnetism. Data da consulta: 09/05/2017, <http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2mb/hg2mb.html>.
- Murray, C. S. (1949). Transformer audio noise problems on an electric power system. *AIEE Transactions*, 68(1):740 – 752.

- Nakase, T., Nakano, M., Fujiwara, K., and Takahashi, N. (1998). Measuring system for magnetostriction of silicon steel sheet under ac excitation using optical methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(4):2072 – 2074.
- Nakata, T., Takahashi, N., Nakano, M., and Miyake, P. (1994). Magnetostriction measurements with a laser doppler velocimeter. *IEEE Transactions on Magnetics*, 30(6):4563 – 4565.
- Norton, M. P. and Karczub, D. G. (2003). *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2nd edition.
- Othonos, A. and Kalli, k. (1999). *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, Boston, Massachusetts, US.
- Peters, K. (2009). *Fiber Bragg grating sensors*, in: C. Boller, F. Chang, Y. Fujino (Eds.), *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley and Sons. (Chapter 61).
- Phophongviwat, T. (2013). *Investigation of the Influence of Magnetostriction and Magnetic Forces on Transformer Core Noise and Vibration*. PhD thesis, Cardiff University, United Kingdom.
- Pinho, L. C. (2009). Materiais magnéticos e suas aplicações. Master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PolyTec (2012). *Operating Instructions and Specifications, PSV-400 Scanning Vibrometer*.
- Pry, R. H. and Bean, C. P. (1958). Calculation of energy loss in magnetic sheet materials using a domain model. *Journal of Applied Physics*, 29(3):532 – 533.
- Repas, R. (2007). The hot and cold of lvdts. Website. Data da consulta: 06/09/2016, <http://machinedesign.com/archive/hot-and-cold-lvdts>.
- Sanchez, J. and Banovic, M. (2014). Classification of transformers family. *Transformers Magazine*, 1(1):24 – 31.
- Say, M. G. (1955). *The Performance and Design of Alternating Current Machines*. Pitman Publishing, London, United Kingdom, 2nd edition.
- Schoppa, A., Louis, H., Pude, F., and Rad, C. v. (2003). Influence of abrasive waterjet cutting on the magnetic properties of non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254(255):370 – 372.
- Sen, P. C. (2013). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Wiley, 3rd edition.
- Sensorland (2010). The strain gauge. Data da consulta: 08/08/2016, <http://www.sensorland.com/HowPage002.html>.
- Sievert, J. (1989). Comparison of different measuring procedures for the determination of the magnetic characteristics of electrical steel sheets using single sheet testers. Technical report, BCR information, Commission of the European Communities, Braunschweig.

- Sievert, J. (1999). The measurement of magnetic properties of electrical sheet steel - survey on methods and situation of standards. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215(6).
- Sievert, J. and Ahlers, H. (2011). Epstein to SST relationship - statistical rather than deterministic. *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(9):17 – 19.
- Sievert, J., Ahlers, H., Brosin, P. C. M., and Luedke, J. (2000). *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, volume 18. IOS Press, Amsterdam, Niederlande.
- Silva, C. W. (1999). *Vibration - Fundamentals and Practice*. CRC Press.
- Singh, R. K. (2008). *Transformers*. McGraw-Hill, 6th edition. Chapter 2 - Principles of Transformers.
- Somkun, S. (2010). Magnetostriction and magnetic anisotropy in non-oriented electrical steels and stator core laminations. Master's thesis, Wolfson Centre of Magnetics, Cardiff University, United Kingdom, Cardiff, United Kingdom.
- Stanbury, H. J. (1984). *Magnetostriction effects at angles to the rolling direction in grain oriented silicon steel*. PhD thesis, University of Wales, Cardiff.
- Stout, M. B. (1960). *Basic Electrical Measurements*. NJ: Prentice-Hall, 2nd edition.
- Teoh, C., Soh, K., Zhou, R., Tien, D., and Chan, V. (1998). Active noise control of transformer noise, international conference on energy management and power delivery. *EMPD '98*, 2:747 – 753.
- ThyssenKrupp Electrical Steel (2015). Grain oriented electrical steel powercore – our products.
- Tumanski, S. (2011). *Handbook of Magnetic Measurements Series in Sensors*. CRC Press.
- Whittaker, J. (1960). Magnetostriction in steel measurement methods for electrical sheet. *Electrical Times*, 137(6):675 – 677.
- Zureks (2008). Powstawanie domen. Data da consulta: 02/10/2016, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PowstawaniedomenbyZureks.png>.

APÊNDICES

APÊNDICE A


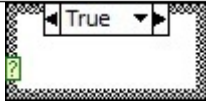












APÊNDICE B


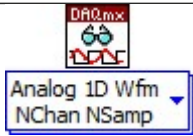
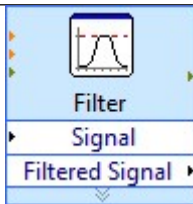
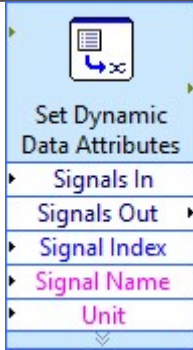
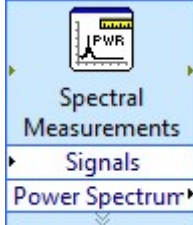
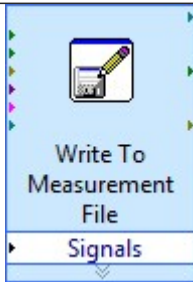
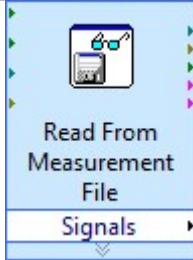
APÊNDICE C







APÊNDICES

APÊNDICE A

Funcionalidades utilizadas no Software LabVIEW

Símbolo	Designação	Aplicação
	While Loop	Iniciar e parar o programa
	Case Structure	Executar um ou mais subdiagramas ou casos e quando a estrutura é acionada
	Numeric Controller	Introduzir parâmetros
	DBL Numeric Constant	Introduzir uma constante numérica no programa
	Convert from Dynamic Data	Converter o sinal gerado/obtido para matrizes de escalares
	Convert from Dynamic Data	Converter o sinal gerado/obtido para o formato de onda
	Convert to Dynamic Data	Obter o parâmetro tempo do sinal tensão
	Integral $x(t).vi$	Integrar o sinal tensão para obter a indução
	Multiply	Multiplicar
	Divide	Dividir
	Get Waveform Components (Analog Waveform) Function	Obter a(s) componente(s) do sinal desejadas.
	DAQmx Create Virtual Channel (VI)	Criar um canal virtual.
	Split Signals	Separar os sinais criados pelo Assistente DAQ
	DAQmx Timing (VI)	Configurar o número de amostras a adquirir ou gerar.

	DAQmx Perform Bridge Offset Nulling Calibration (VI)	Ajustar as deformações dos extensómetros para zero antes de iniciar as medições.
	DAQmx Read (VI) – Analog 1D Wfm NChan NSamp	Ler uma ou mais condições de uma tarefa que contenha um ou mais canais analógicos de entrada.
	Filter Express VI	Filtrar os sinais de deformação, corrente e tensão
	Set Dynamic Data Attributes Express VI	Definir atributos a um ou mais sinais.
	Spectral Measurements Express VI	Executar medições espectrais.
	Write To Measurement File Express VI	Gravar dados em ficheiros no formato .lvm, .tdm, .tdms ou .xlsx.
	Read From Measurement File Express VI	Ler dados de ficheiros no formato .lvm, .tdm ou .tdms.

	Unbundle By Name Function	Devolve ao mostrador elementos especificados.
	Unbundle Function	Divide um mostrador em cada um dos seus elementos individuais.
	Or Function	Avalia o Ou lógico dos sinais de entrada.
	Path Control	Definir a localização de um ficheiro a ler.
	Slide Control	Controlo Deslizante
	Graph	Representar os sinais gerado/obtido e os parâmetros calculados a, partir dos mesmos.

APÊNDICE B

PLANO DE TESTES

Os parâmetros comuns a todas as etapas são o comprimento e a largura da amostra (300 e 30 mm, respectivamente), a frequência (50 Hz) e os valores da indução.

Fase 0

A Fase 0 tem como objetivo a formulação dos métodos e a prova de conceitos de metodologia para identificação de magnetostricção. Para isso, selecionou-se uma chapa magnética das frequentemente utilizadas pela EFACEC que à partida levaria à obtenção de magnitudes de magnetostricção mais elevadas, para que as medições sejam mais imunes a interferências eletromagnéticas. O tipo de instrumentação a utilizar nesta fase é a extensometria. A espessura da chapa são 0.30 mm e o corte é feito por guilhotina/prensa.

Fase 1

A fase 1 tem como objetivo determinar qual o tipo de instrumentação mais adequado para a medição de magnetostricção dos aços tipicamente utilizados pela EFACEC. Esta fase é composta por 4 subfases. Em cada uma delas são feitos ensaios com um tipo de instrumentação e comparados os resultados com os obtidos na(s) Subfase(s) anterior(es). Estando o objetivo da presente fase cumprido, pode prosseguir-se para qualquer uma das que se seguem.

Fase 2

Na fase 2 pretende-se determinar os efeitos dos procedimentos de corte na magnetostricção da chapa. Devem ser testadas amostras obtidas pelo processo de corte mais utilizado neste tipo de aplicações (guilhotina) e, também, por outros processos, tais como, corte a laser e corte a jato de água. Posteriormente, devem ser feitos tratamentos térmicos às chapas testadas anteriormente nesta fase e averiguar os seus efeitos na atenuação dos danos causados pelos processos de corte.

Fase 3

Na terceira fase é estudada a influência da espessura da chapa na magnetostricção. Serão testadas chapas com 0.23 e 0.27 e comparados os resultados obtidos com os provenientes da Fase 1.

Fase 4

A fase 4 tem como objetivo estudar a influência das tensões mecânicas no comportamento magnetostritivo da chapa. Para isso, as amostras deverão ser submetidas a vários esforços de tração e compressão durante os ensaios, e os resultados deverão ser comparados com os de tensões em vazio.

Fase 5

Na quinta fase pretende-se estudar o efeito da temperatura no comportamento magnetostritivo da chapa. Para isso, devem ser testadas amostras à temperatura ambiente e a 120°C, a temperatura típica de funcionamento de transformadores de potência.

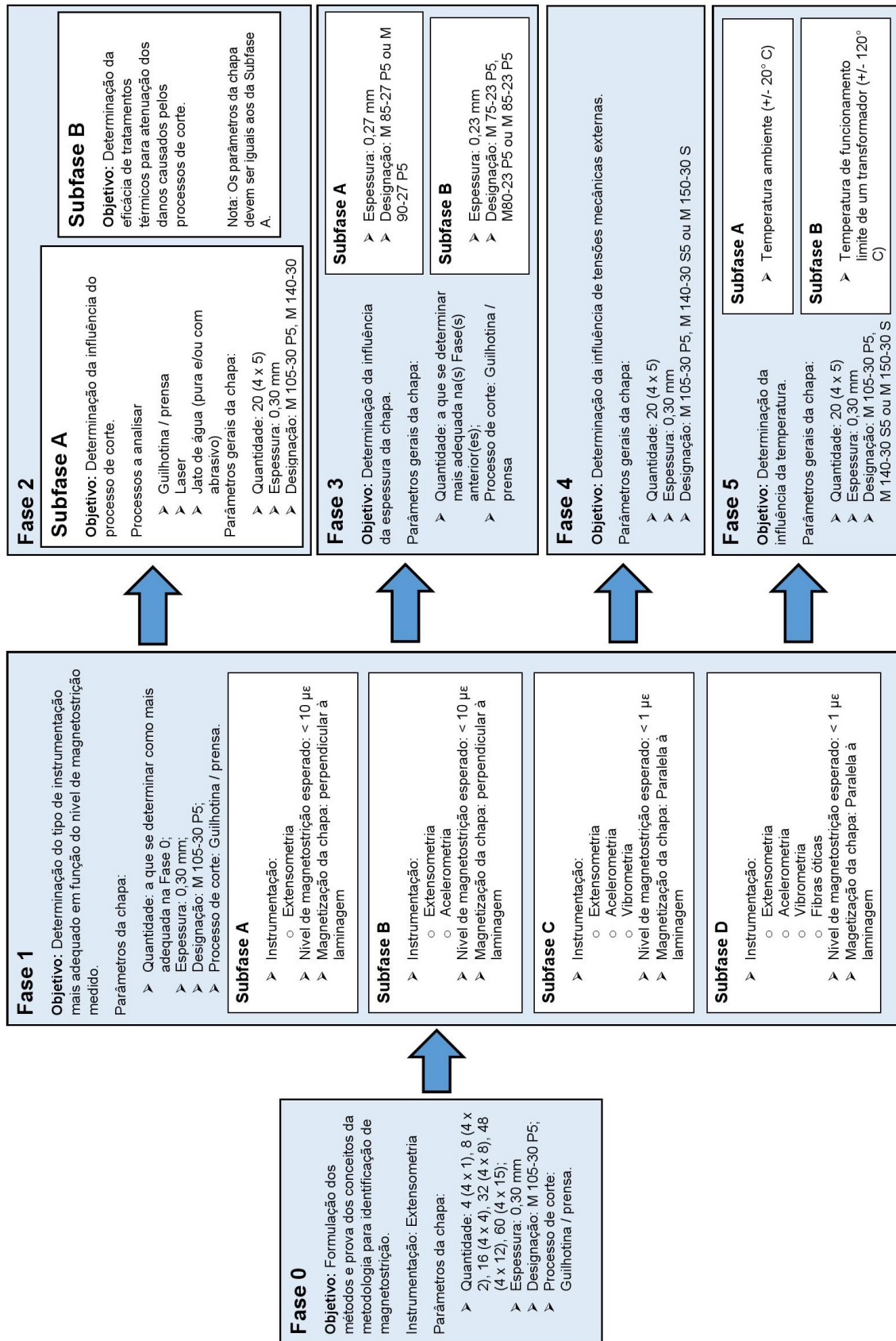


Figura 8.1: Plano de Testes.

APÊNDICE C

RESULTADOS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE CHAPAS

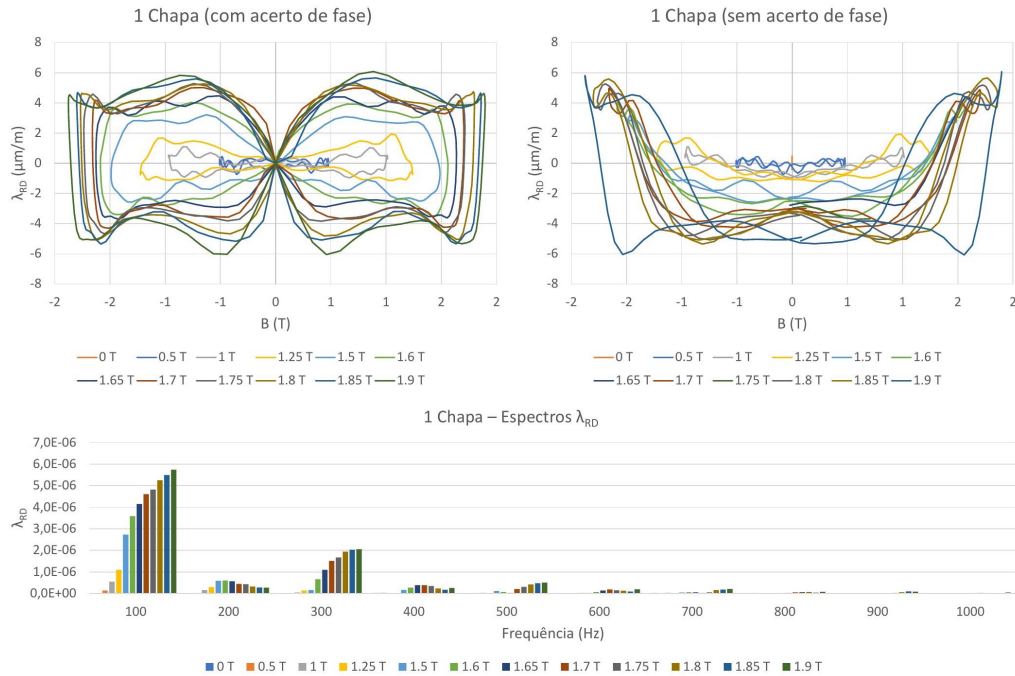


Figura 8.2: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1 chapa relativas à direção da laminagem da chapa.

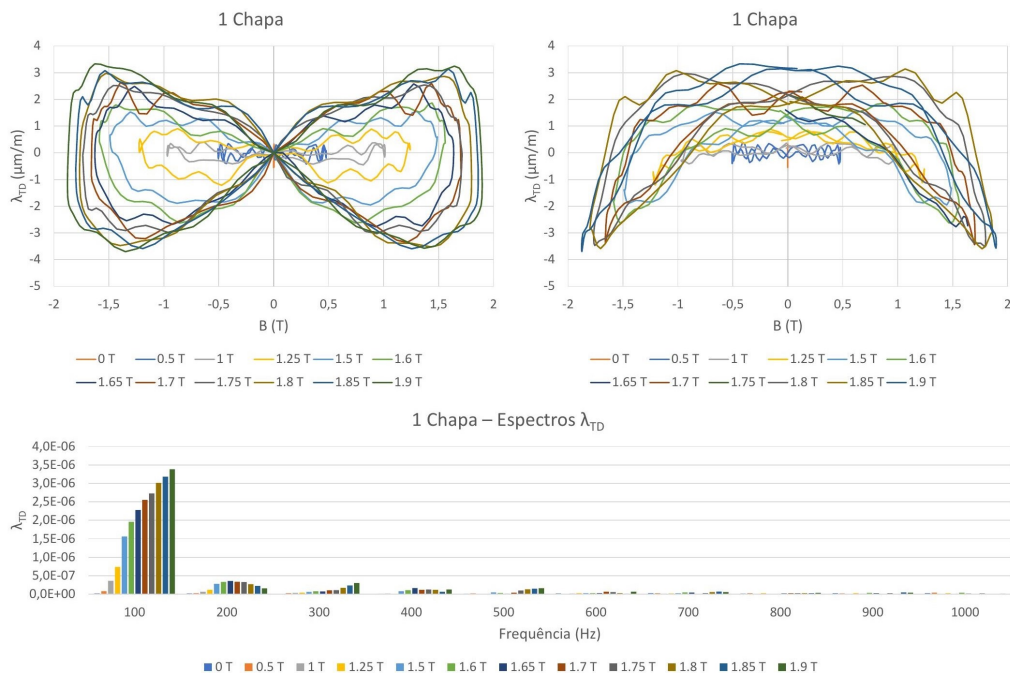


Figura 8.3: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1 chapa relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

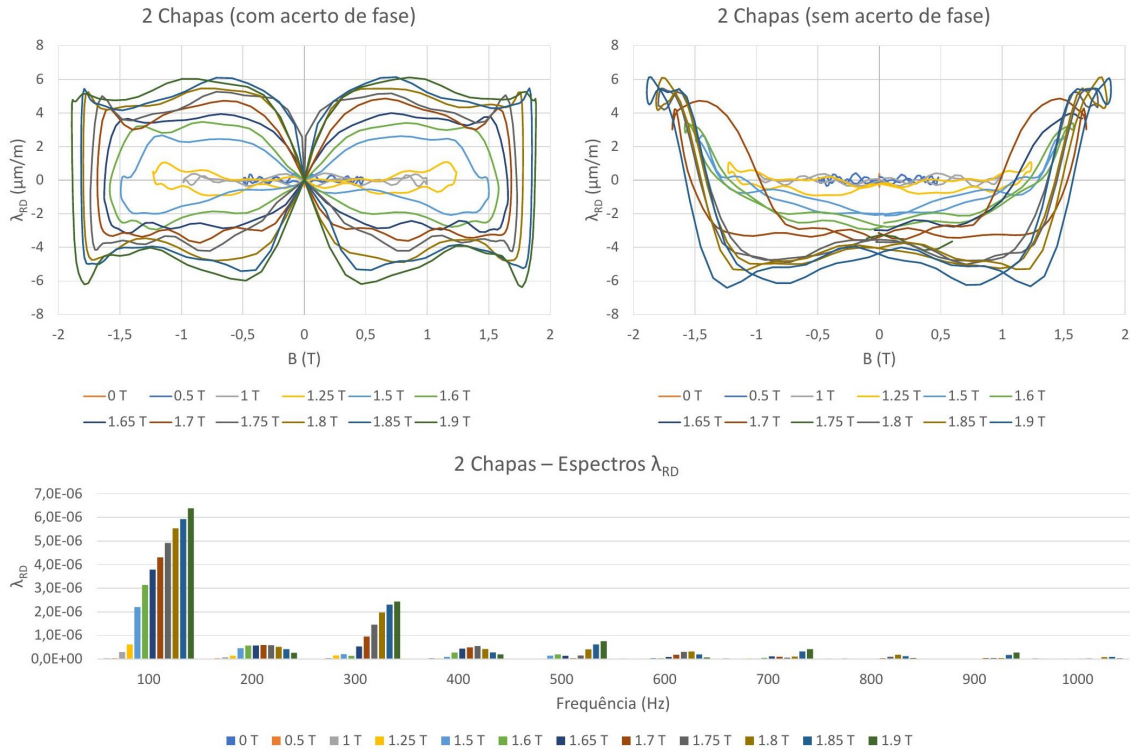


Figura 8.4: Curvas de borboleta e espectros das medições com 2 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.

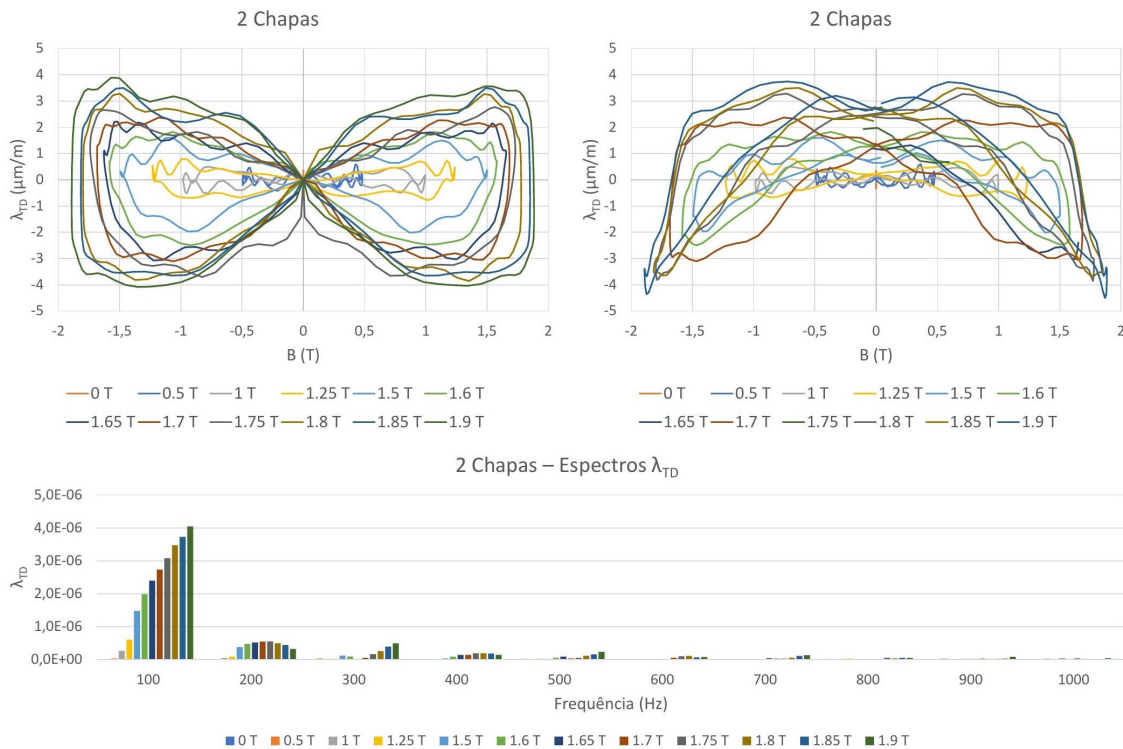


Figura 8.5: Curvas de borboleta e espectros das medições com 2 chapas relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

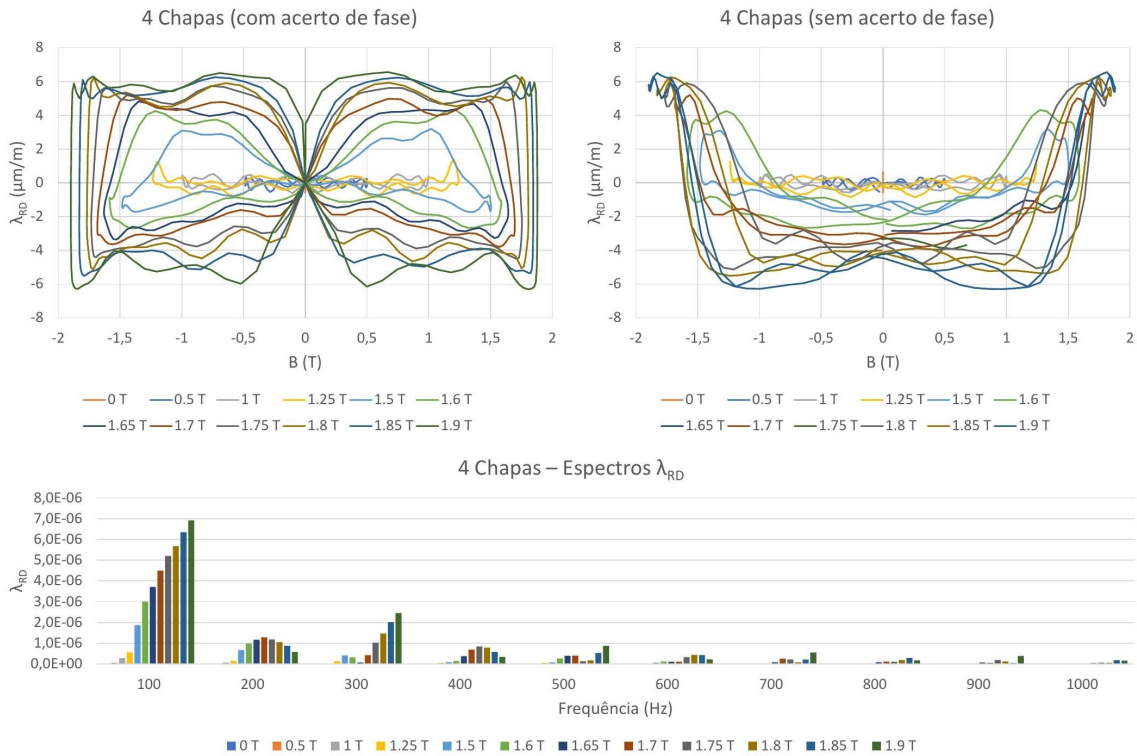


Figura 8.6: Curvas de borboleta e espectros das medições com 4 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.

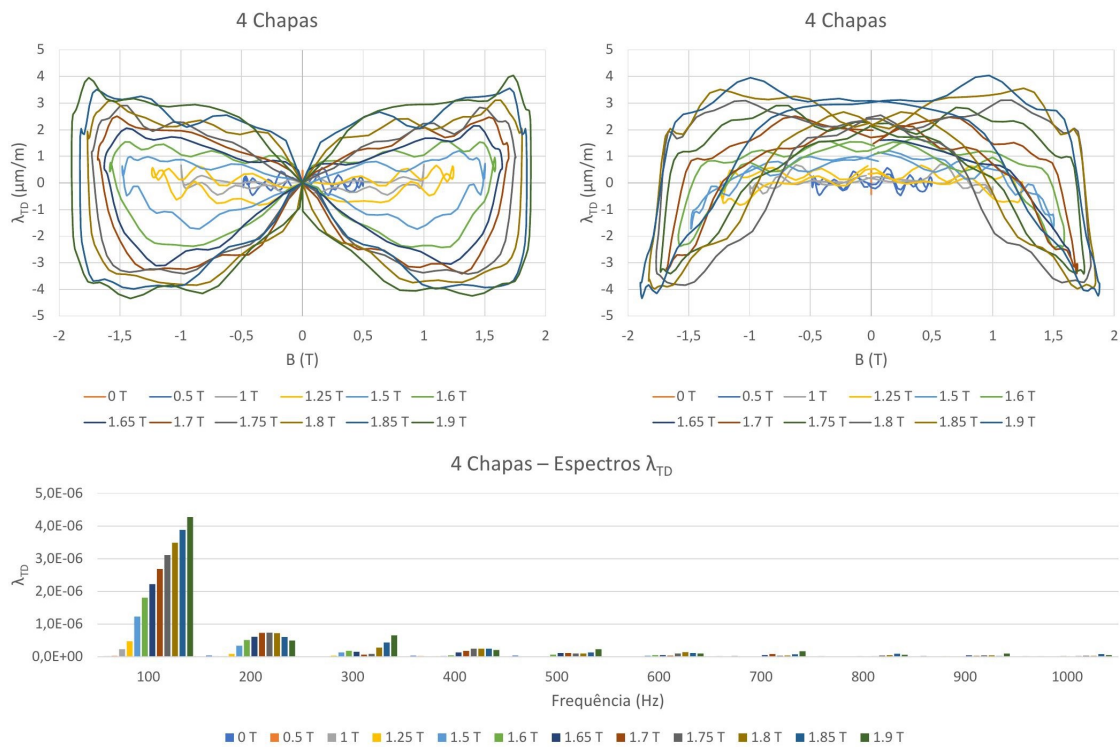


Figura 8.7: Curvas de borboleta e espectros das medições com 4 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

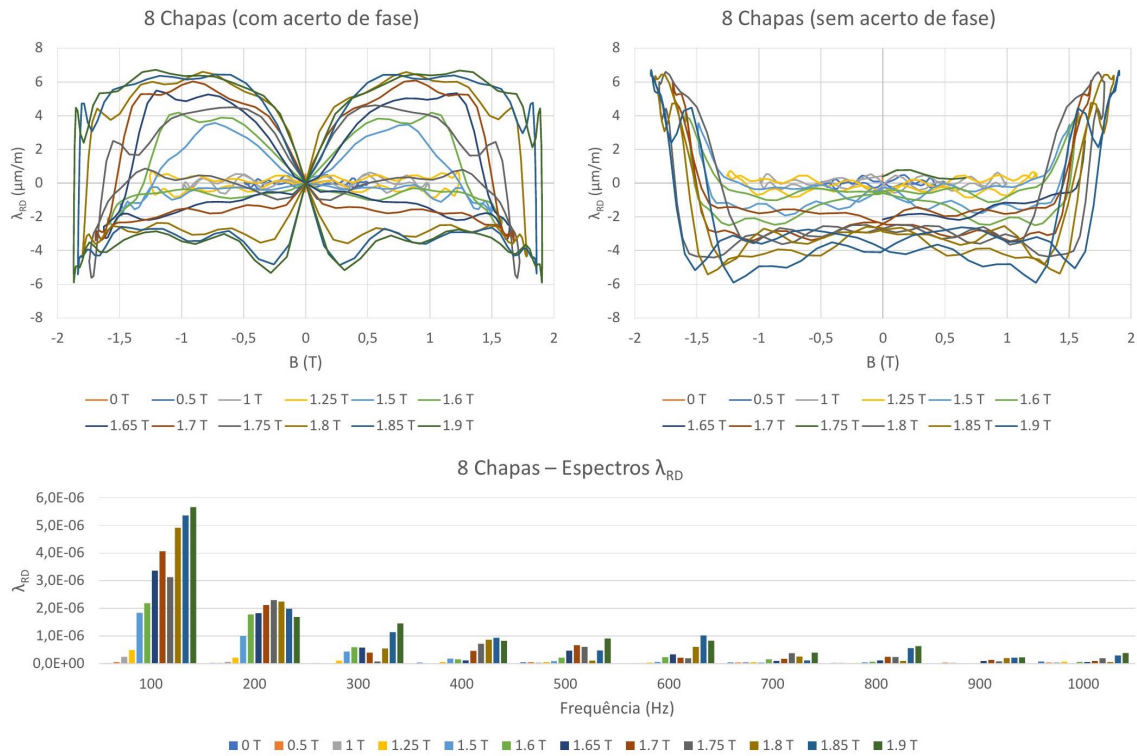


Figura 8.8: Curvas de borboleta e espectros das medições com 8 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.

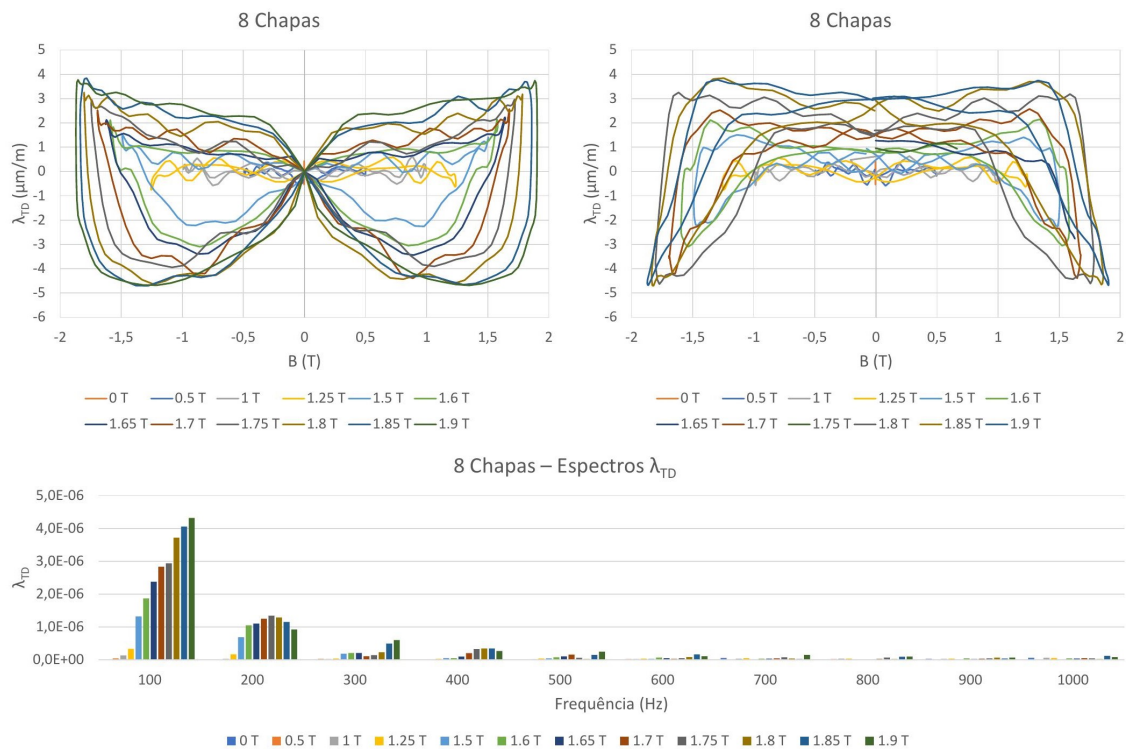


Figura 8.9: Curvas de borboleta e espectros das medições com 8 chapas relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

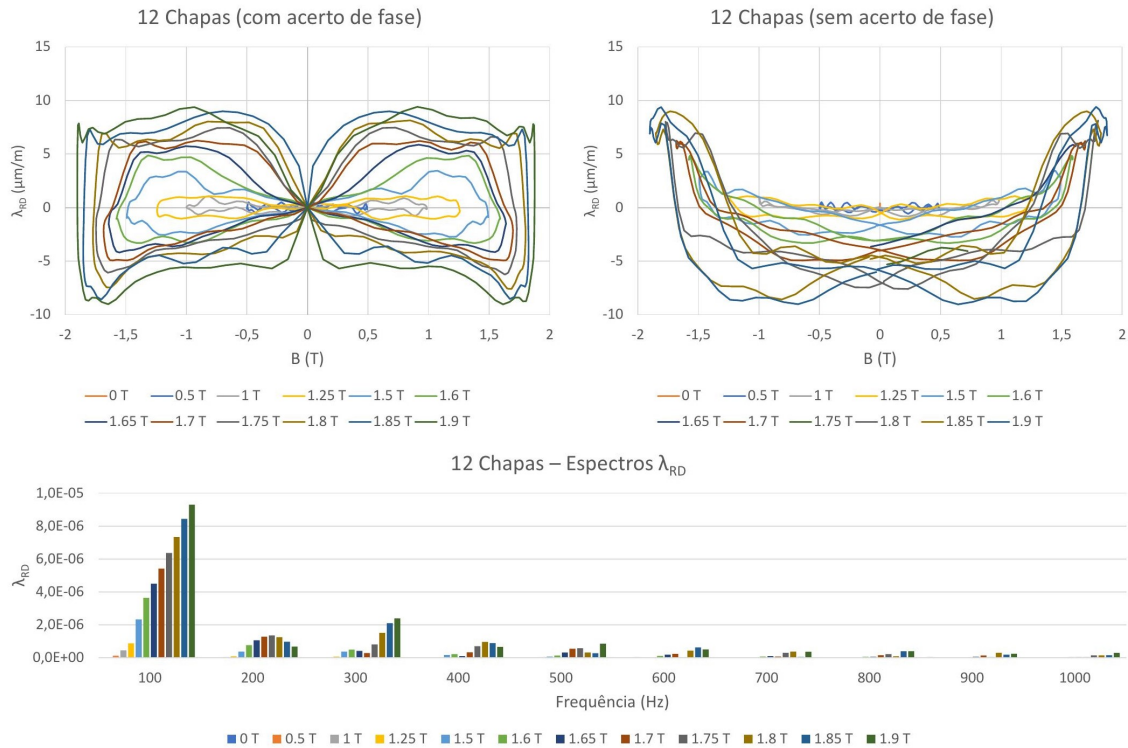


Figura 8.10: Curvas de borboleta e espectros das medições com 12 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.

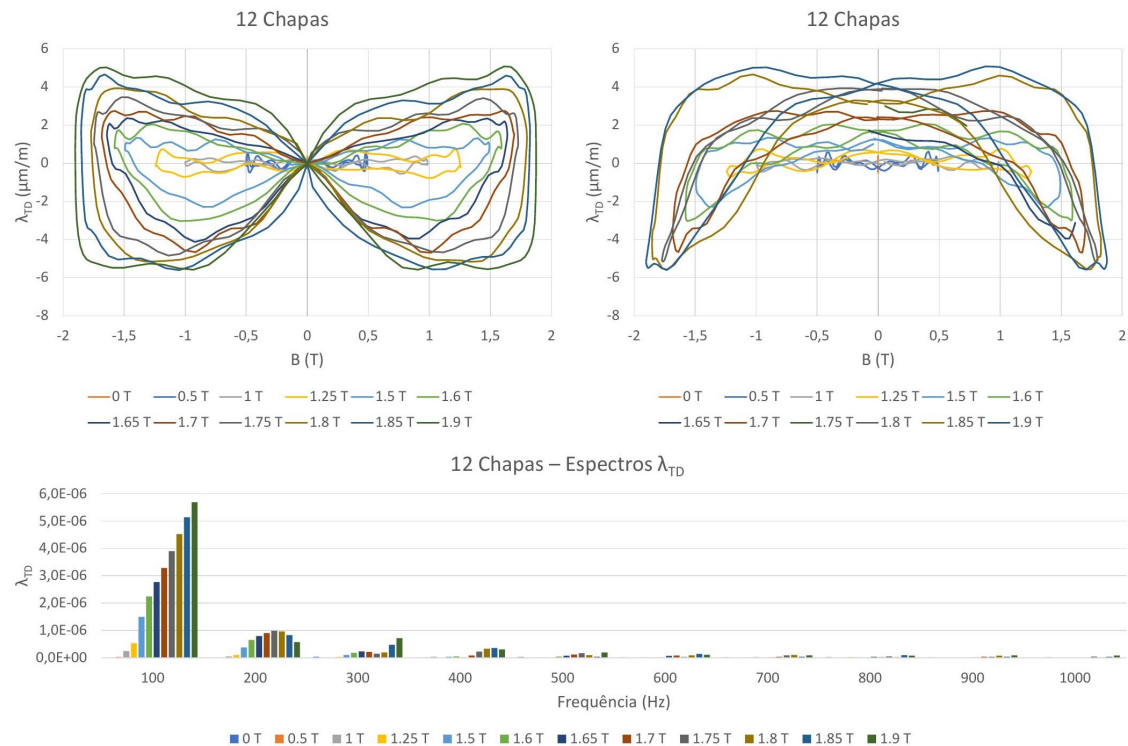


Figura 8.11: Curvas de borboleta e espectros das medições com 12 chapas relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

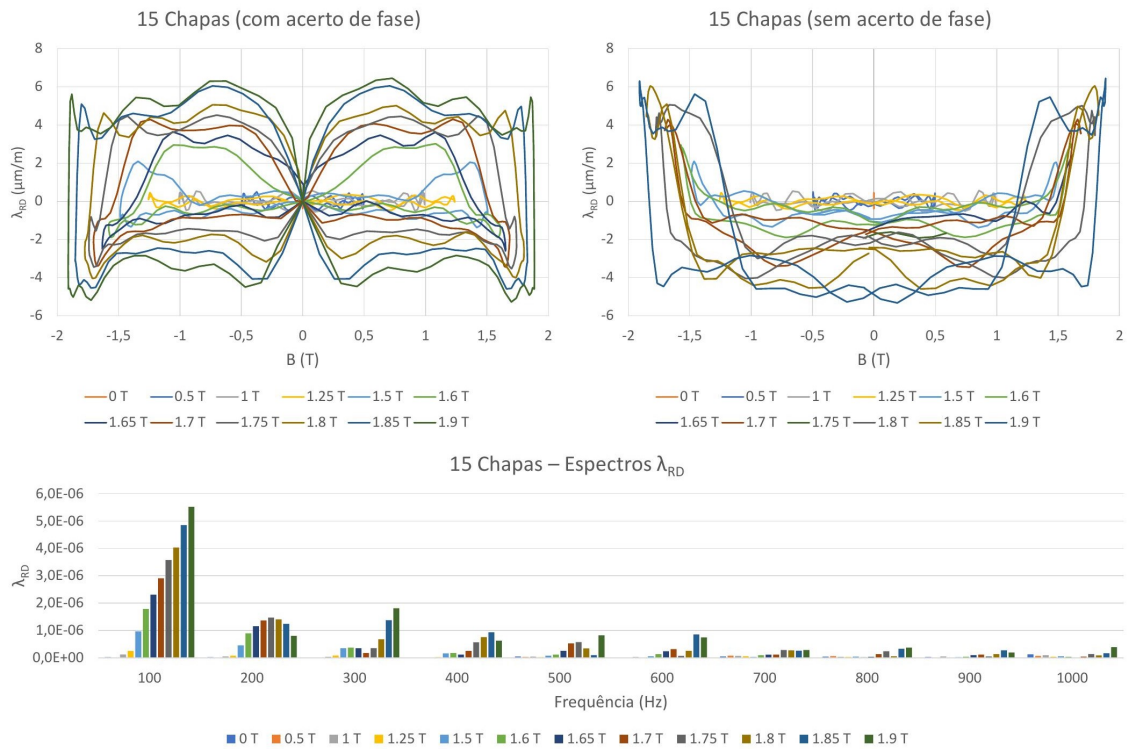


Figura 8.12: Curvas de borboleta e espectros das medições com 15 chapas relativas à direção da laminagem da chapa.

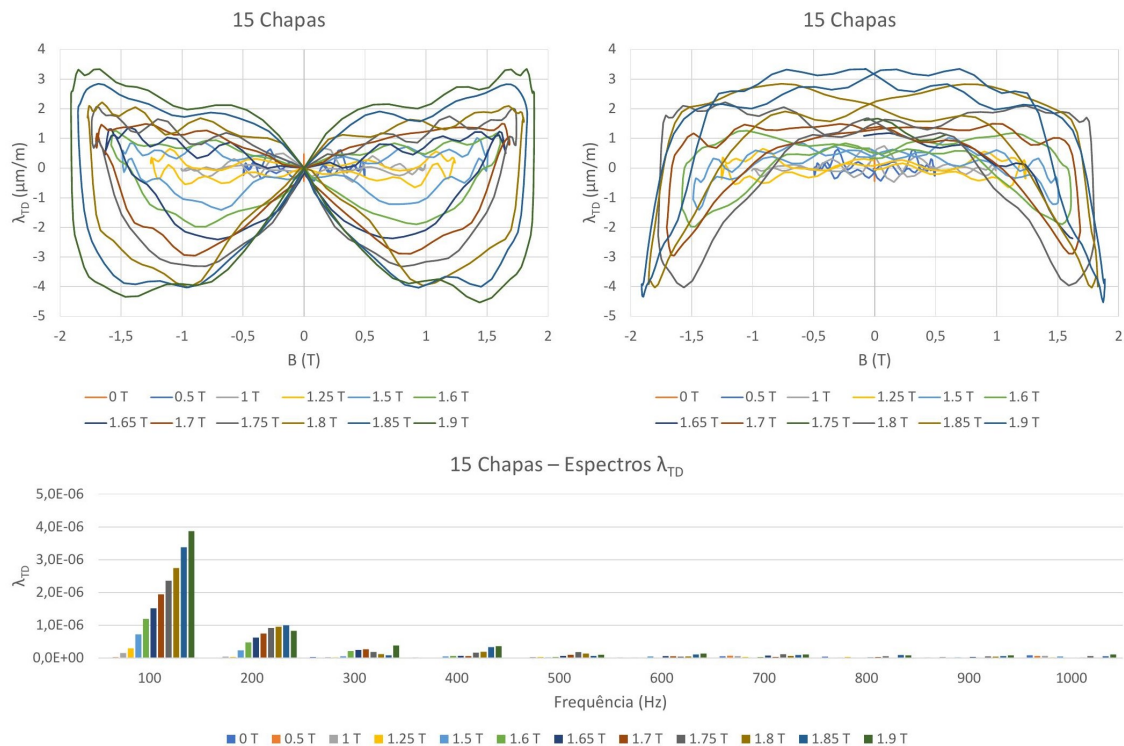


Figura 8.13: Curvas de borboleta e espectros das medições com 15 chapas relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

RESULTADOS EM FUNÇÃO DA INDUÇÃO MAGNÉTICA

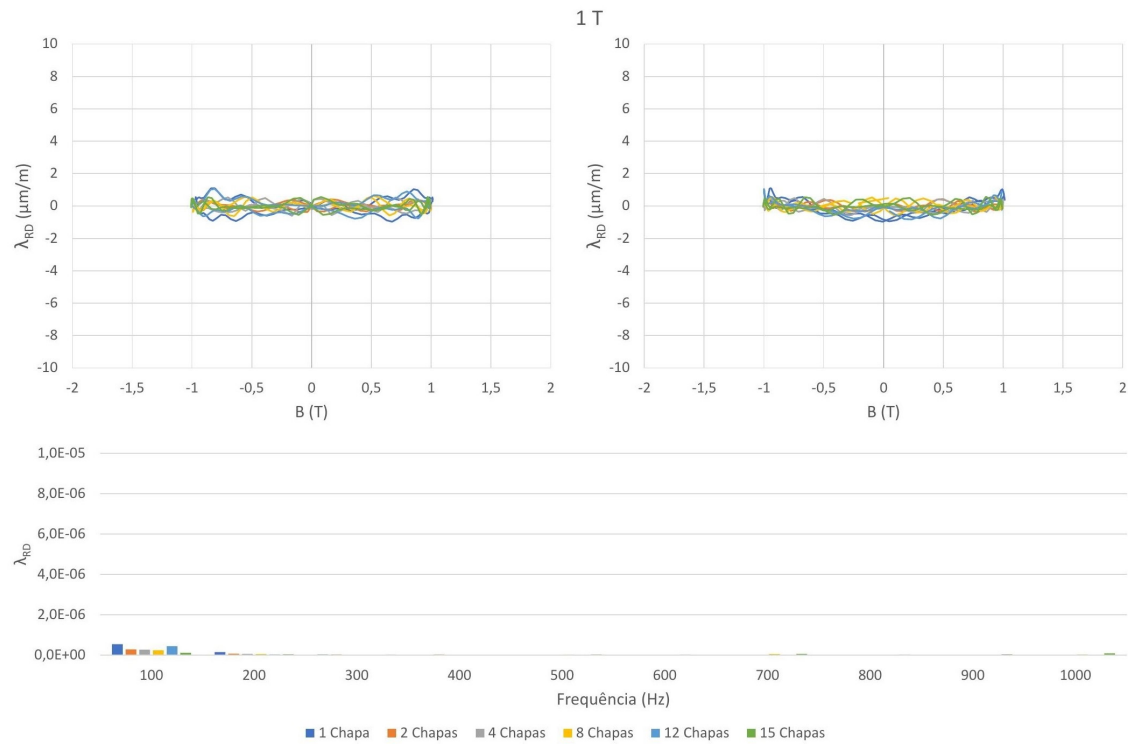


Figura 8.14: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

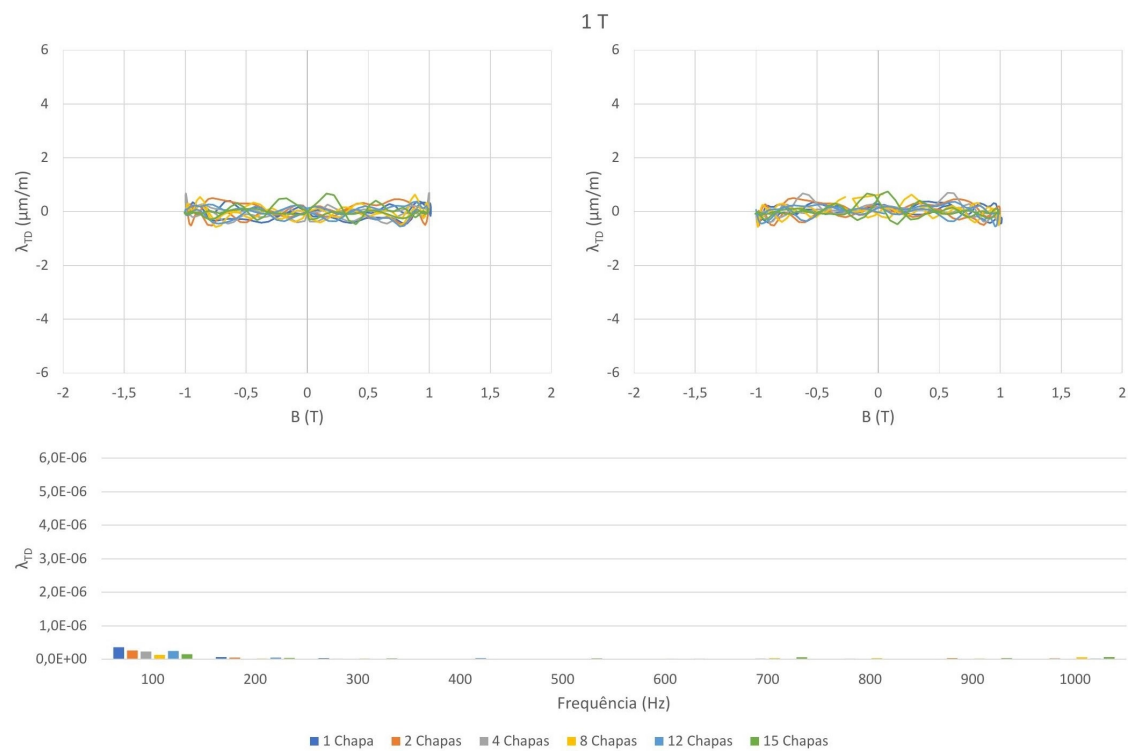


Figura 8.15: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1 T de indução relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

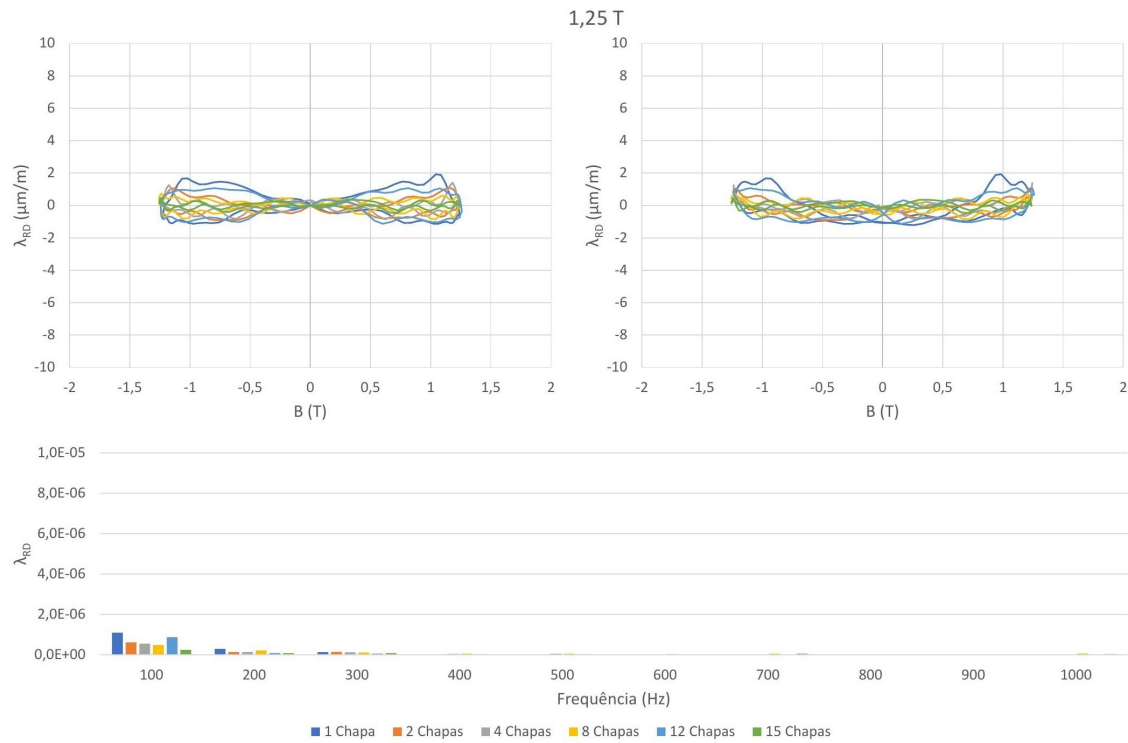


Figura 8.16: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.25 T de indução relativos à direção da laminagem da chapa.

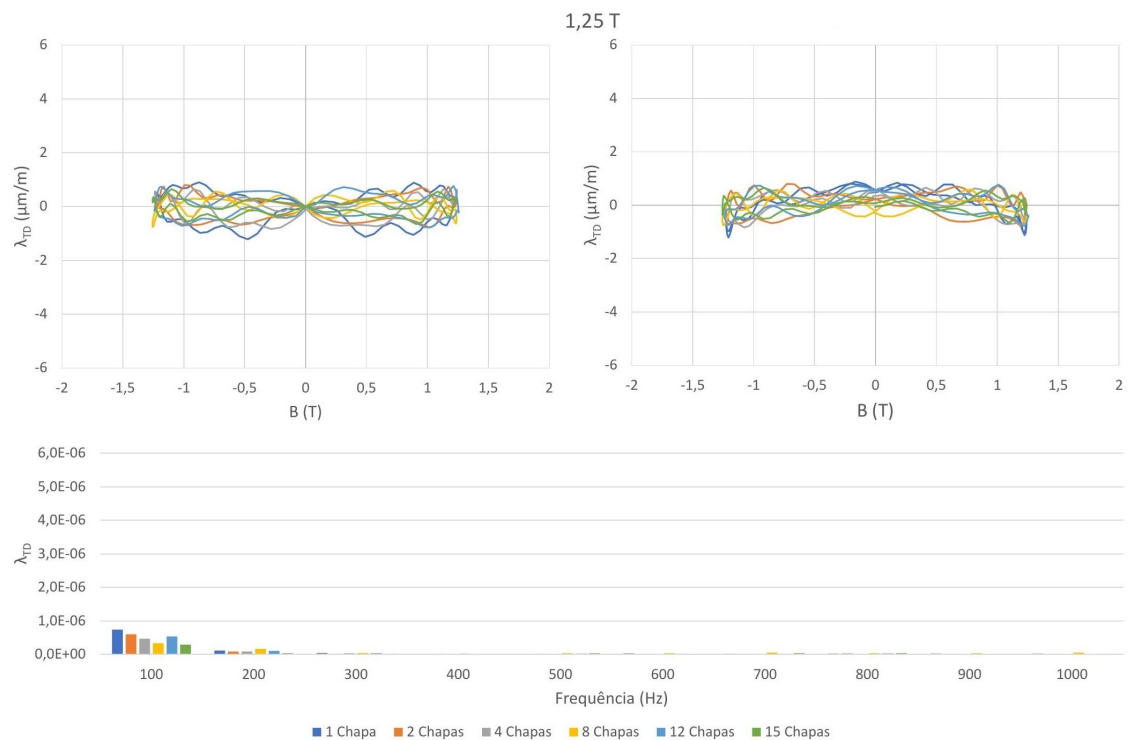


Figura 8.17: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.25 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

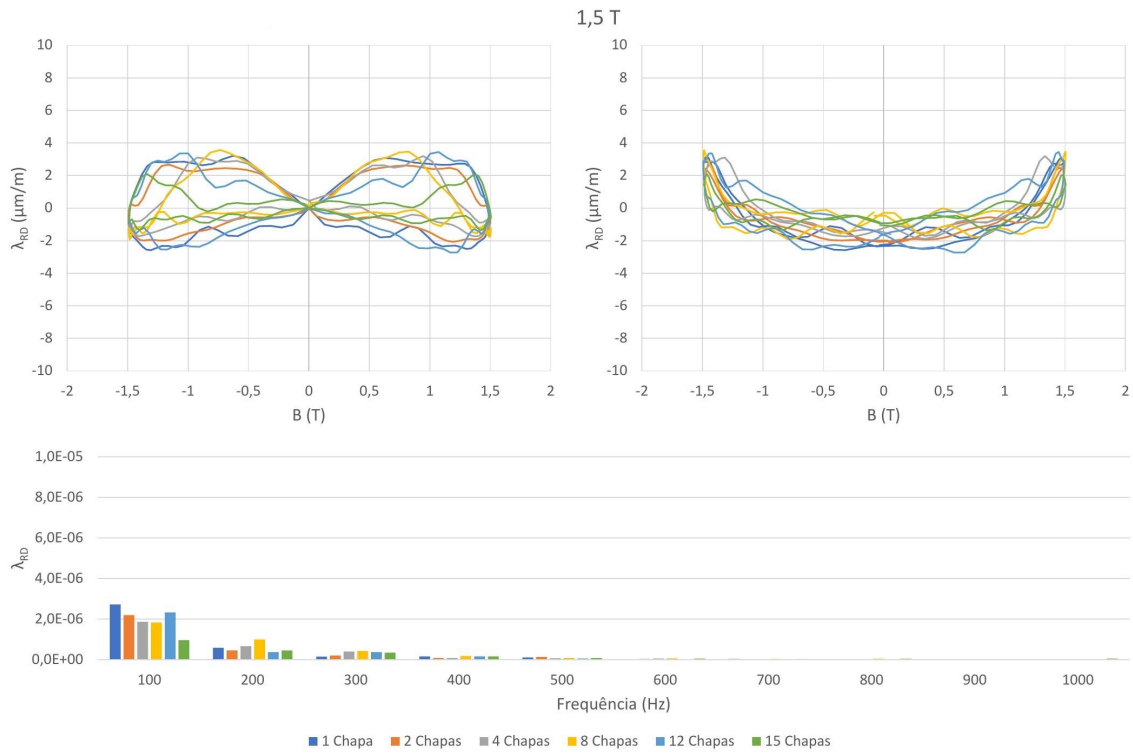


Figura 8.18: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,5 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

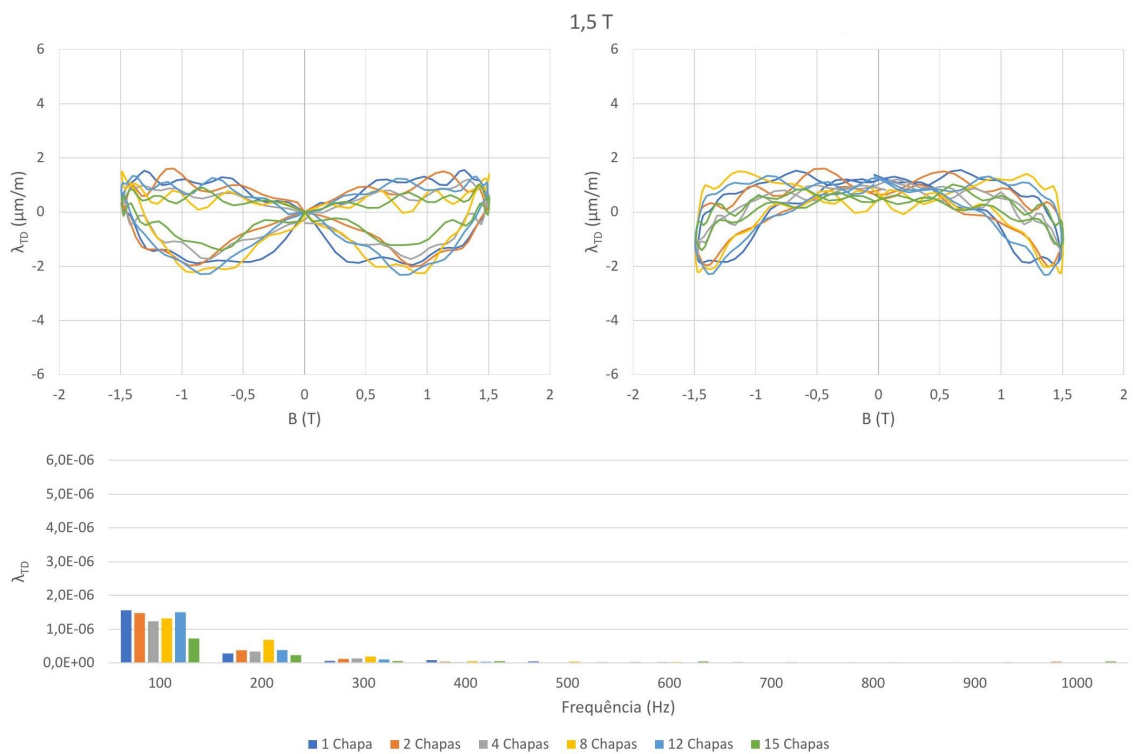


Figura 8.19: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,5 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

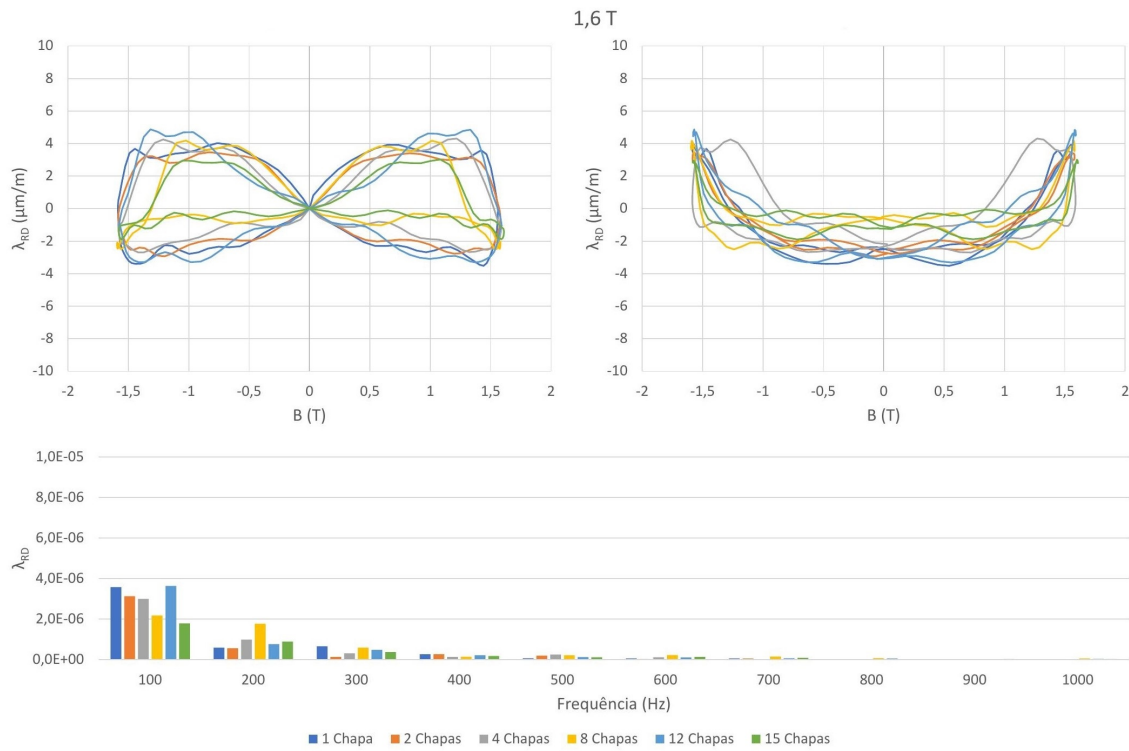


Figura 8.20: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,6 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

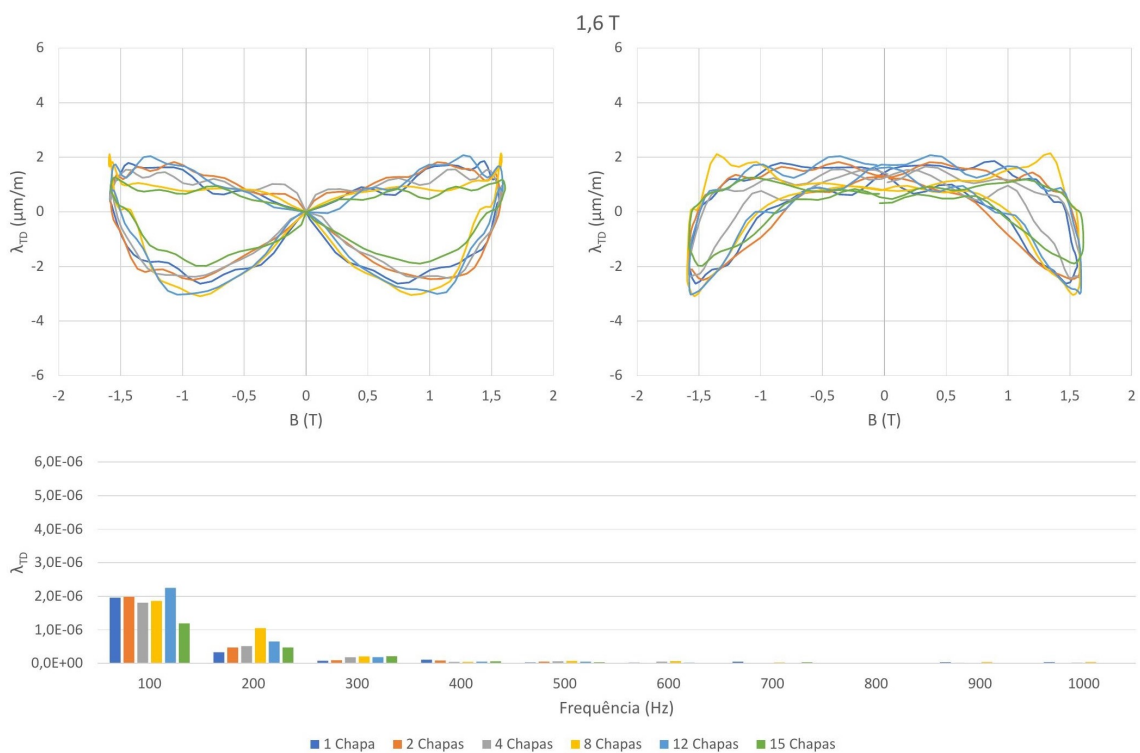


Figura 8.21: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,6 T de indução relativas à direção transversal à laminagem da chapa.

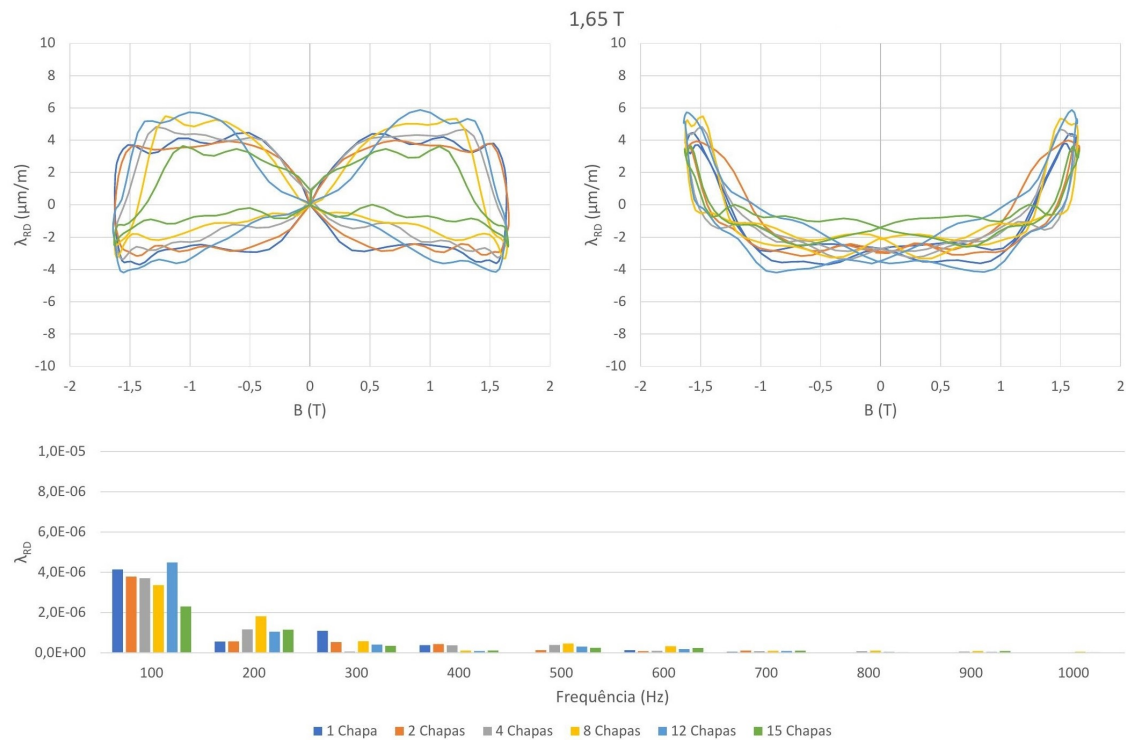


Figura 8.22: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.65 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

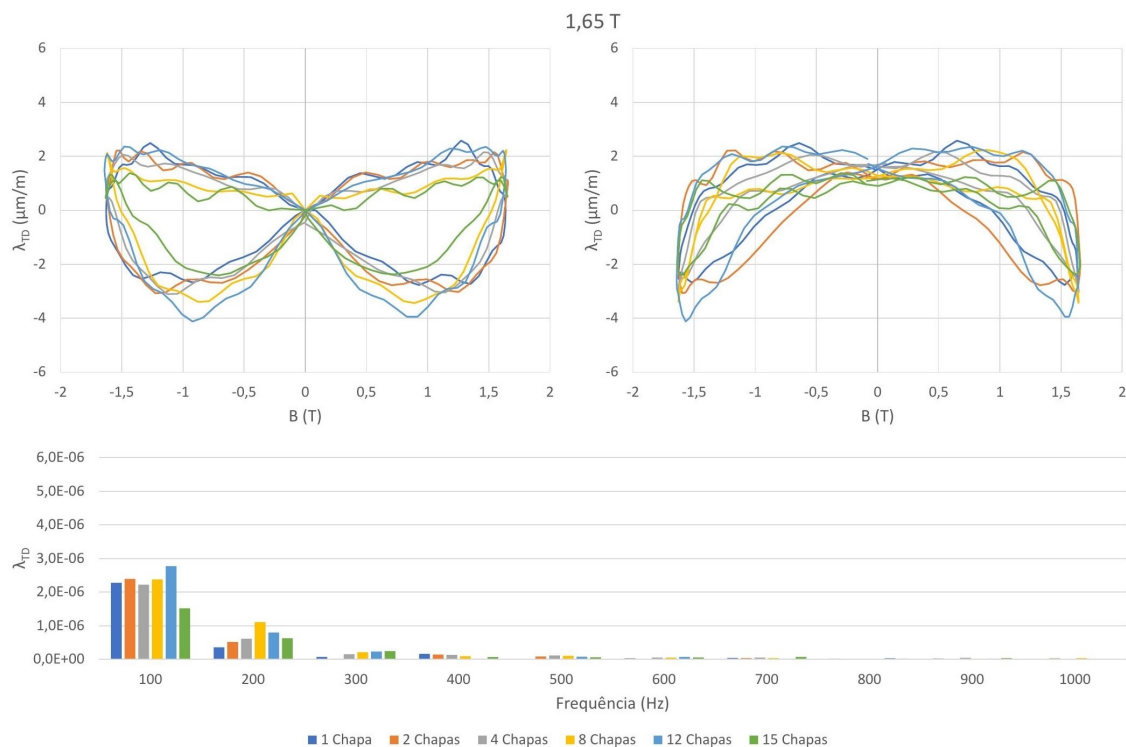


Figura 8.23: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.65 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

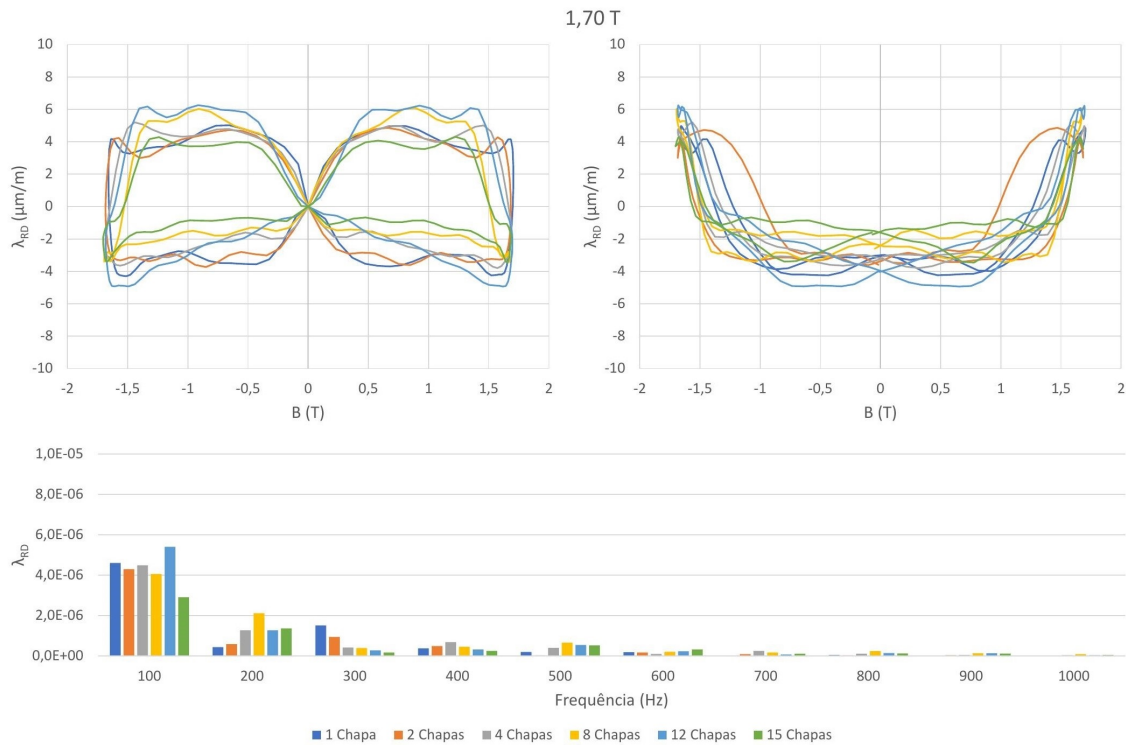


Figura 8.24: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,7 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

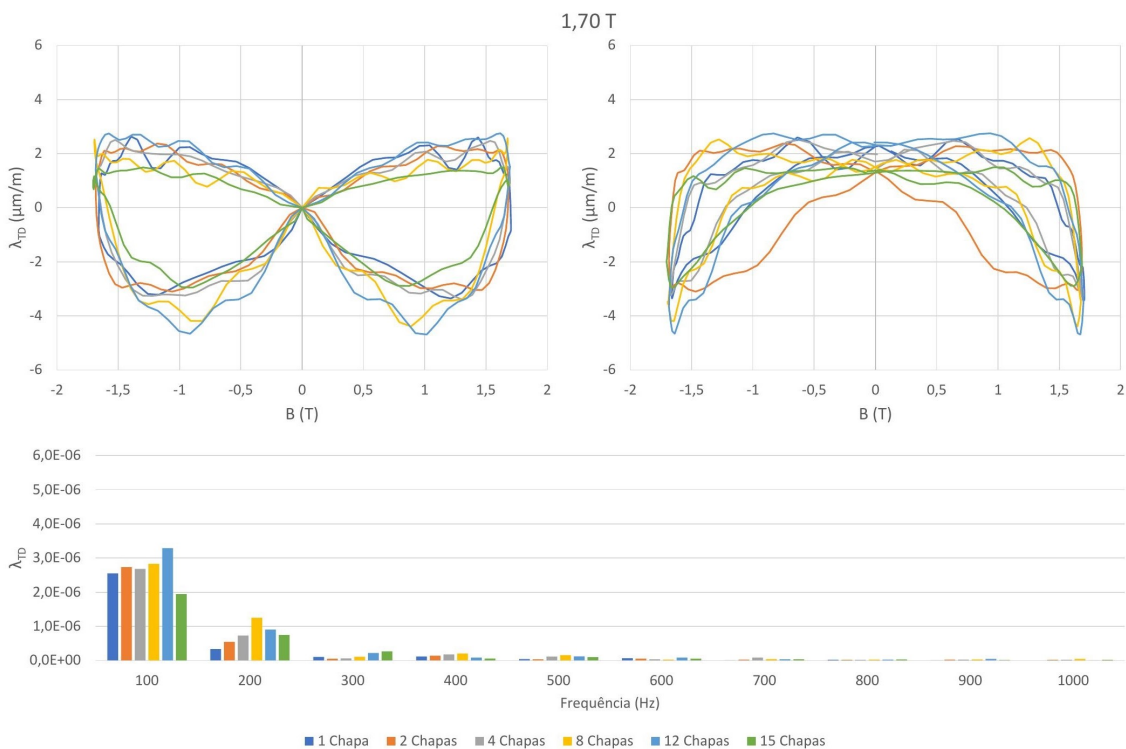


Figura 8.25: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,7 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

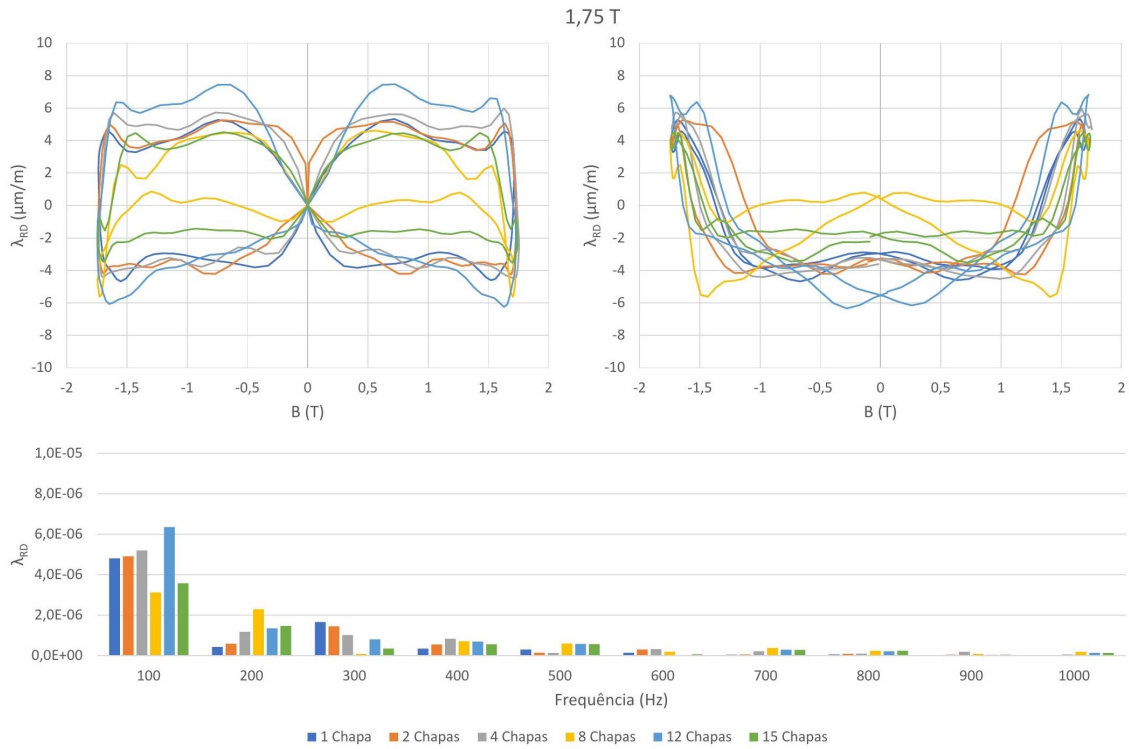


Figura 8.26: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.75 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

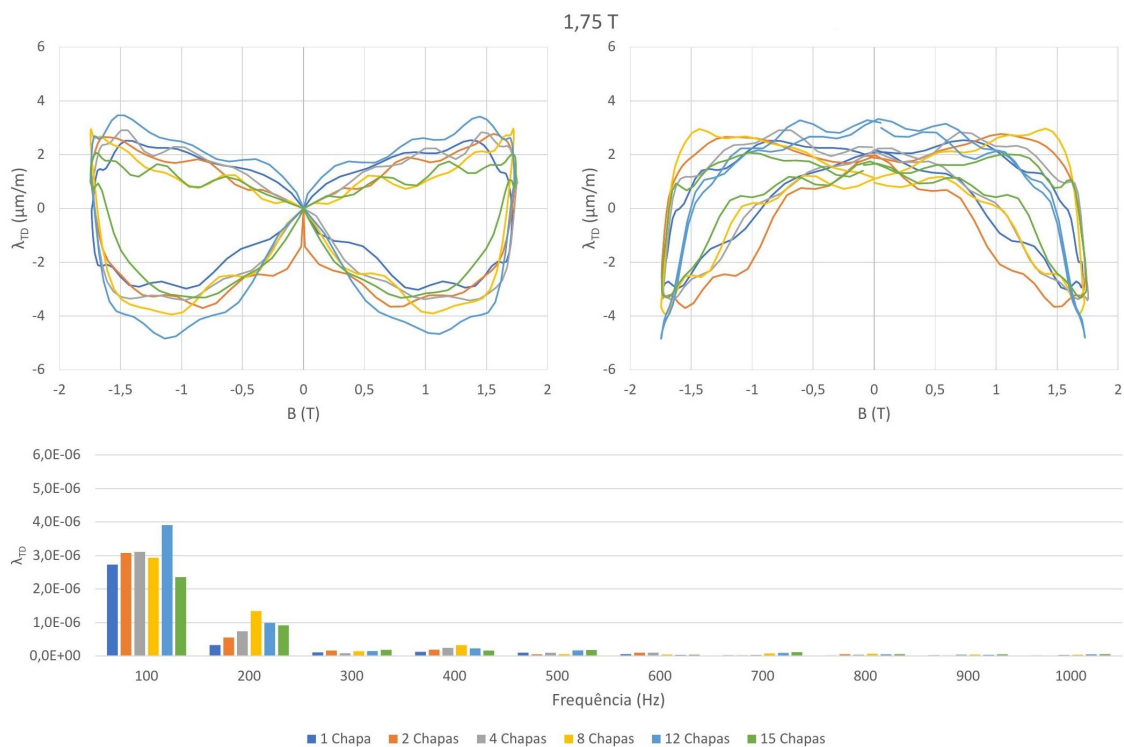


Figura 8.27: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.75 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

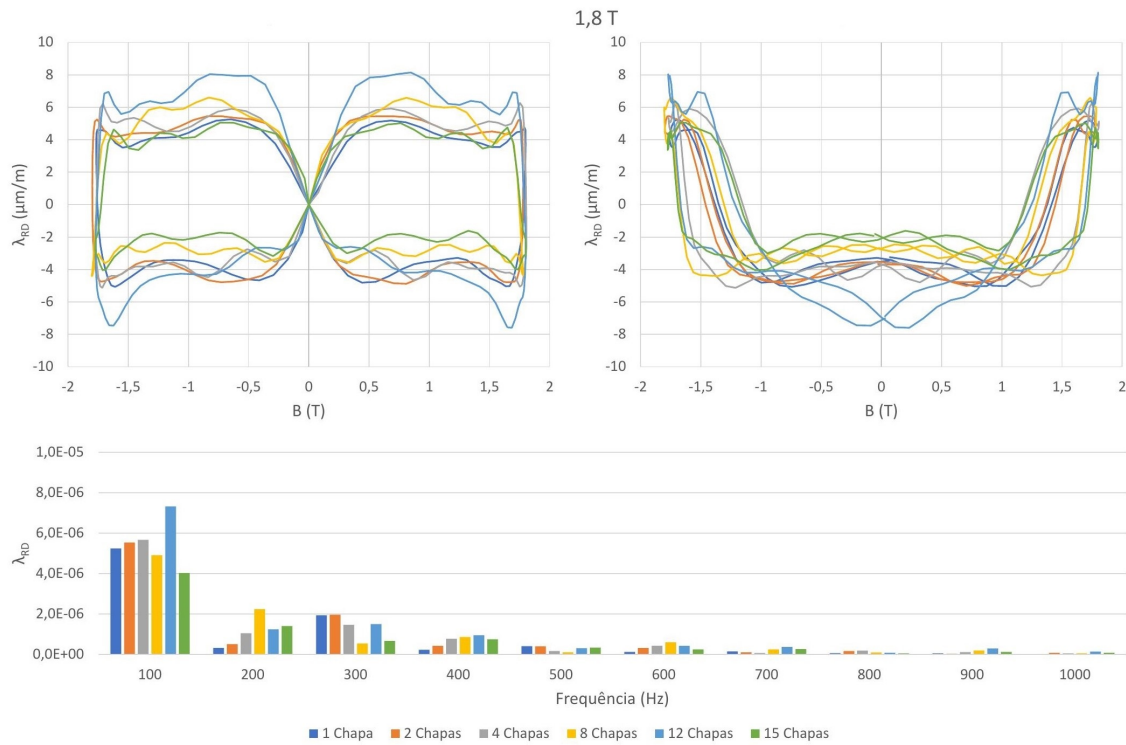


Figura 8.28: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,8 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

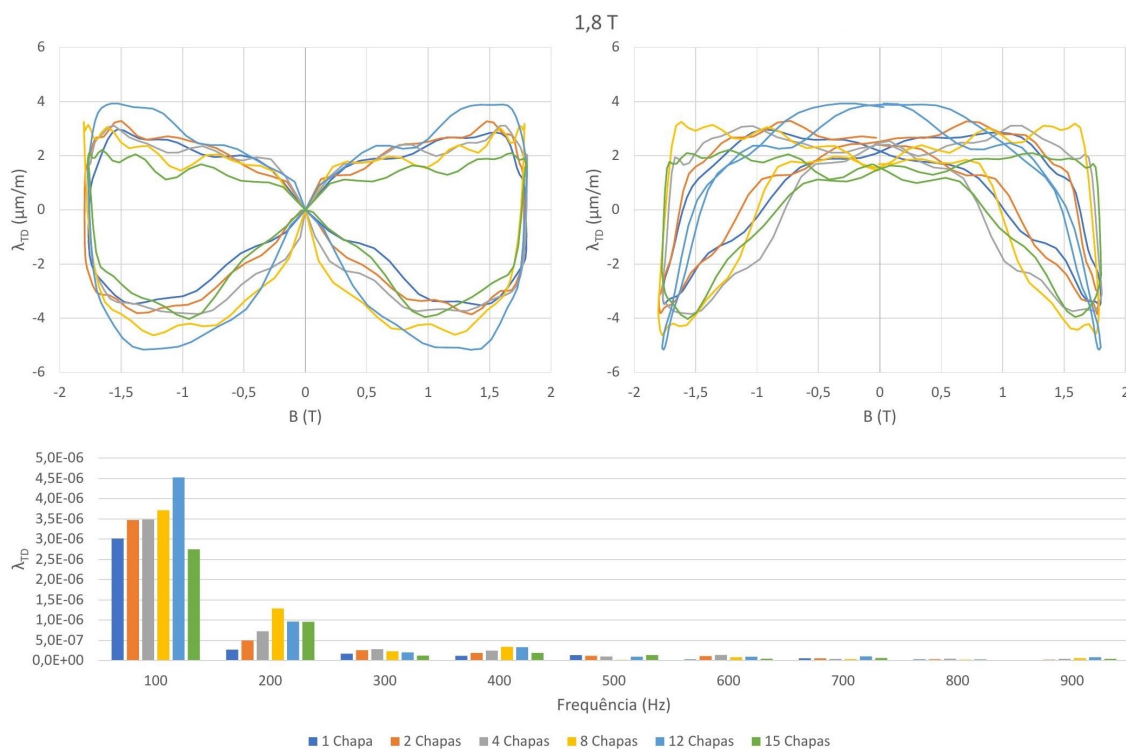


Figura 8.29: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,8 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

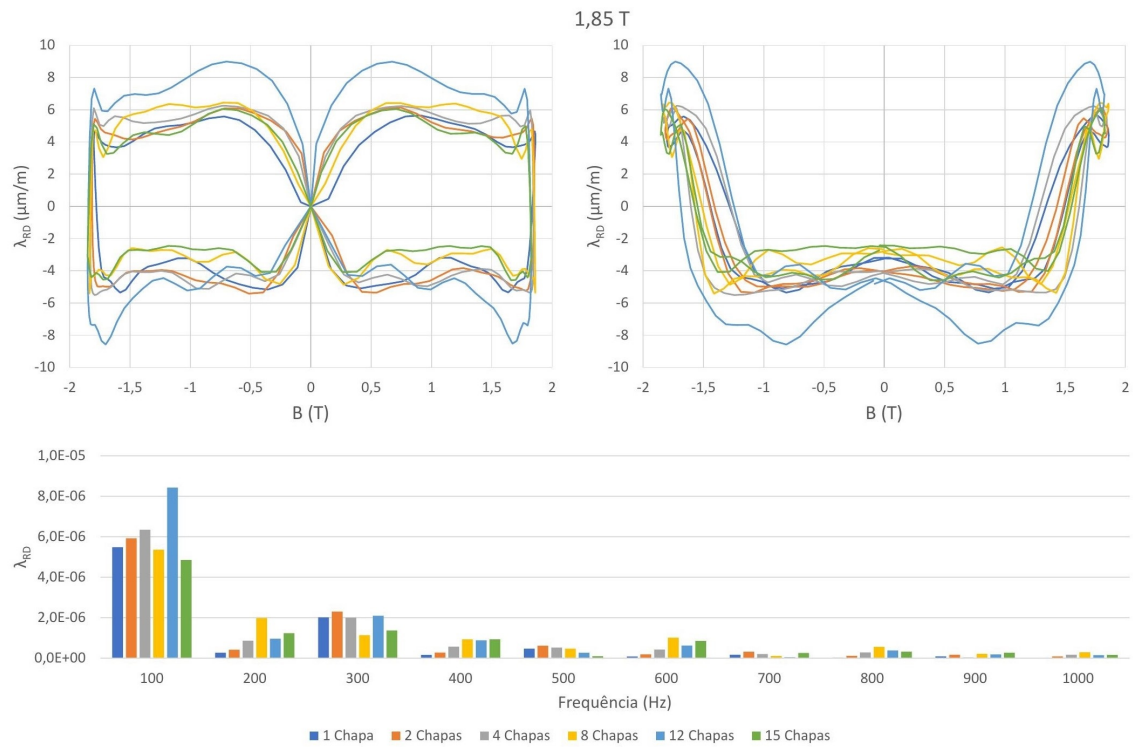


Figura 8.30: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.85 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

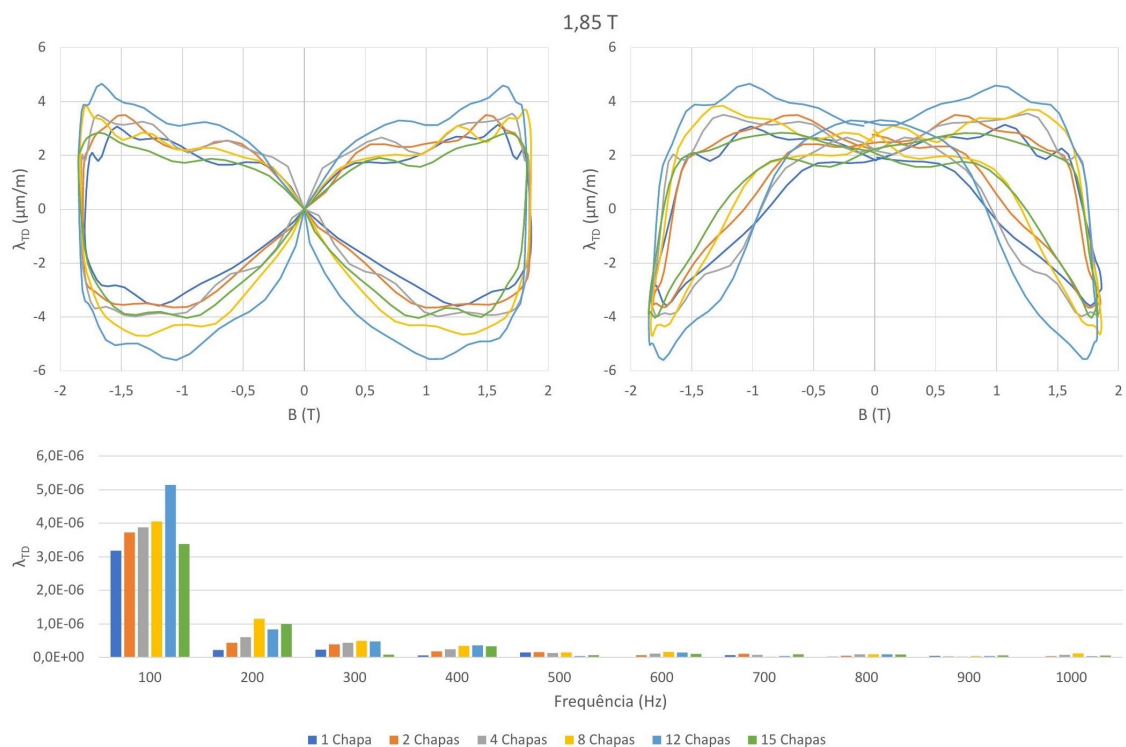


Figura 8.31: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1.85 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.

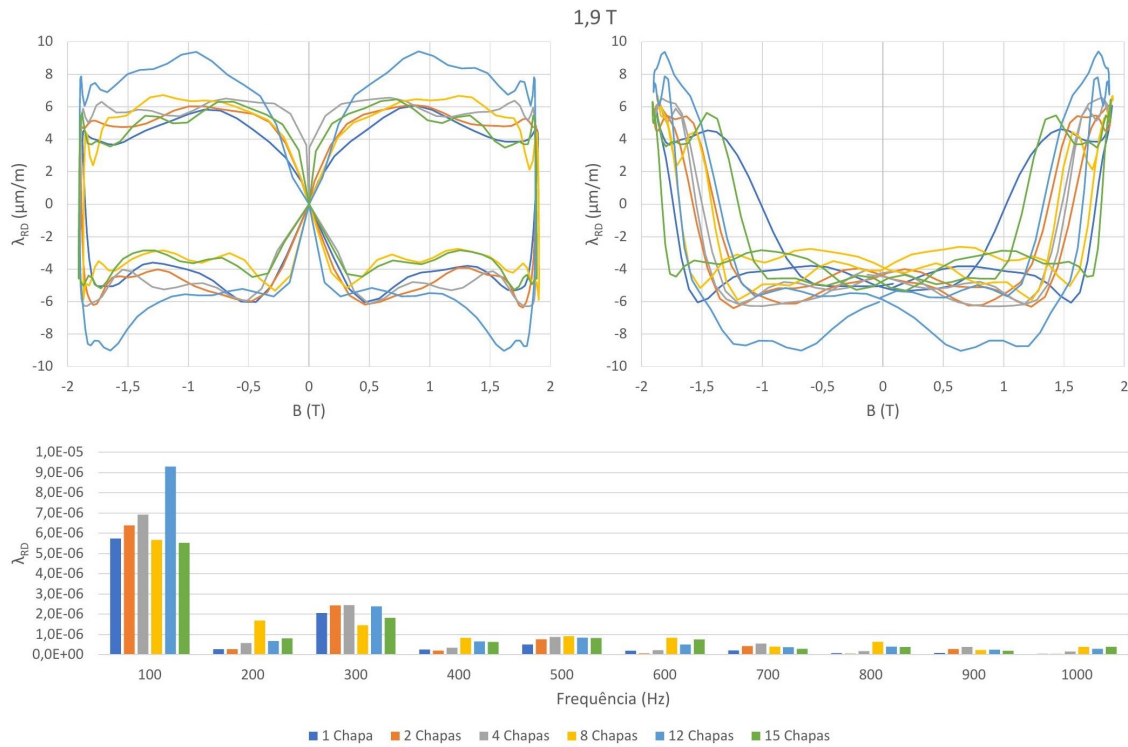


Figura 8.32: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,9 T de indução relativas à direção da laminagem da chapa.

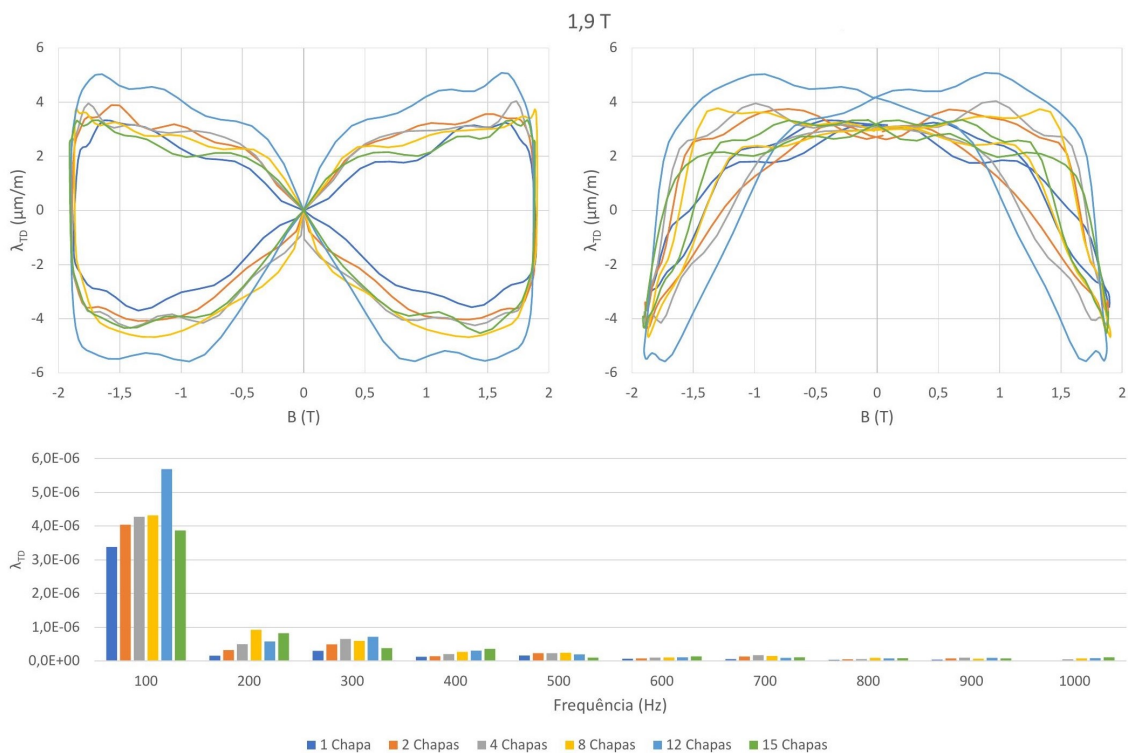


Figura 8.33: Curvas de borboleta e espectros das medições com 1, 2, 4, 8, 12 e 15 chapas a 1,9 T de indução relativos à direção transversal à laminagem da chapa.