



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Indiara Pitta Corrêa da Silva

**ESTUDOS SOBRE O EFEITO DOS ESFORÇOS MECÂNICOS NO
COMPORTAMENTO DE VALORES DE PARÂMETROS DE MODELOS DE
PERDAS MAGNÉTICAS**

FLORIANÓPOLIS

2019

Indiara Pitta Corrêa da Silva

**ESTUDOS SOBRE O EFEITO DOS ESFORÇOS MECÂNICOS NO
COMPORTAMENTO DE VALORES DE PARÂMETROS DE MODELOS DE
PERDAS MAGNÉTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Indiara Pitta Corrêa da

Estudos sobre o efeito dos esforços mecânicos no comportamento de valores de parâmetros de modelos de perdas magnéticas / Indiara Pitta Corrêa da Silva ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Nelson Sadowski, 2019.

154 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Acoplamento magnetomecânico. 3. Caracterização magnética. 4. Separação de perdas magnéticas. 5. Determinação de valores de parâmetros. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Sadowski, Nelson . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Indiara Pitta Corrêa da Silva

**ESTUDOS SOBRE O EFEITO DOS ESFORÇOS MECÂNICOS NO
COMPORTAMENTO DE VALORES DE PARÂMETROS DE MODELOS DE
PERDAS MAGNÉTICAS**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Laurent Didier Bernard, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sandro Carlos Lima, Dr.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Prof. Laurent Daniel, Dr.
CentraleSupelec

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Richard Demo Souza
Coordenador em Exercício do Programa

Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela
Orientador

Florianópolis, 25 de novembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Telma e Zebio, e meus irmãos, Acauã, Raíra e Uiara, por serem inspirações e fazerem parte de tudo o que conquistei até hoje.

Aos demais familiares que incentivaram e torceram pelo meu sucesso.

Ao Edilberto por todo o apoio, companheirismo e força, fundamentais principalmente nos momentos mais difíceis e desafiadores destes anos. Por fazer parte e vibrar comigo em mais uma conquista.

A meus orientadores, Prof. Jhoe e Prof. Sadowski, pela confiança que depositaram em mim e pelo suporte neste trabalho, desde a definição do tema, quanto nos ensaios, nas análises e na correção final do texto.

Ao Benjamin, por ter iniciado o estudo neste tema e a construção da bancada que possibilitou a realização desta dissertação. Pelo auxílio na utilização dos equipamentos, além das discussões e sugestões muito pertinentes. Além da amizade e convívio diário em grande parte do tempo deste mestrado.

Aos colegas do LAESP: Ricardo, André Carvalho, Helton, Luis Grillo, Danilo, Marjorie, Guilherme Santos, Cristian e Carlos, dentre outros, que fizeram com que o dia-a-dia de trabalho fosse mais leve e divertido.

Aos demais professores do GRUCAD que foram importantes na minha formação disciplinar da pós-graduação e que passaram conhecimentos também aplicados nesta dissertação.

À banca avaliadora composta pelos professores Jean Leite, Sandro Lima, Laurent Bernard e Laurent Daniel, pelas sugestões e comentários pertinentes realizados no texto.

À WEG S.A. por ter disponibilizado as amostras laminadas utilizadas nos ensaios deste trabalho.

À Lis, ao Marcelo e ao Wilson, pela paciência e auxílio nos procedimentos burocráticos do mestrado, principalmente durante a finalização do mesmo.

À Capes pelo auxílio financeiro durante o período do mestrado.

Por fim, agradeço a todos que direta e indiretamente fizeram parte desta caminhada acadêmica e de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa
ignorância. (J. F. KENNEDY, 1962)

RESUMO

O objetivo do trabalho é realizar uma contribuição com estudos experimentais e analíticos que relacionam entre si efeitos mecânicos e magnéticos no comportamento de materiais ferromagnéticos para aplicações em equipamentos elétricos. Especificadamente, sob o aspecto das perdas magnéticas, efeitos magnetomecânicos são levados em conta em análises da variação dos valores dos parâmetros de modelos de perdas magnéticas em função da intensidade de esforços mecânicos. O material estudado é um aço para fins elétricos de grão não orientado, tendo amostras com direções de corte de 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação. Utilizou-se uma bancada de caracterização magnética que possibilita aplicações de esforços mecânicos uniaxiais, tanto de tração quanto de compressão, e controle do fluxo magnético nas lâminas. Sob os dois tipos de carregamentos mecânicos (tração e compressão), em várias intensidades, as perdas magnéticas do material nas diferentes direções de corte são separadas em modelos que consideram duas parcelas (histerese e dinâmicas) e em três parcelas (histerese, clássicas e excedentes). O comportamento dos valores dos parâmetros de cada tipo de perdas é analisado em função da indução e dos níveis de esforços mecânicos aplicados. Os comportamentos magnéticos do material estudado, sob esforços mecânicos, obtidos experimentalmente, foram similares aos apresentados na literatura. Quando aplicados esforços de tração, ocorreu diminuição dos valores das perdas magnéticas (as curvas de perdas em função do nível de tração são relativamente próximas). Quando aplicados esforços de compressão, os valores das perdas sofreram aumentos significativos com o aumento do carregamento. Através de análises comparativas de modelos das perdas por histerese, foram determinados aqueles que melhor representam o comportamento do material utilizado nesta dissertação. Uma discussão sobre os comportamentos dos valores dos parâmetros dos modelos em função do nível de esforço aplicado também foi realizada.

Palavras-chave: Acoplamento magnetomecânico. Material de grão não orientado. Caracterização magnética. Separação de perdas magnéticas. Determinação de valores de parâmetros.

ABSTRACT

This paper aims to contribute with experimental and analytical studies relating mechanical and magnetic effects on the behavior of ferromagnetic materials for electrical equipment applications. Specifically, under the aspect of magnetic losses, magnetomechanical effects analysis are taken into account in the variation of the parameter values of magnetic loss models as a function of mechanical stress. The studied material is a non-oriented grain electric steel, having samples with cutting directions of 0° , 45° and 90° in relation to the rolling direction. The bench used allows applications of uniaxial mechanical forces, both traction and compression, and control of magnetic flux in the sheet. Under the two types of mechanical stress (tension and compression), at various intensities, the magnetic losses of the material in the different cutting directions are separated into models that consider two parts (hysteresis and dynamic) and three parts (hysteresis, classical and excess losses). The behavior of the parameter values of each type of loss is analyzed as a function of induction and the levels of applied mechanical stress. The magnetic behaviors of the studied material obtained experimentally, under mechanical stress, were similar to those presented in the literature. When tensile stress was applied, magnetic loss values decreased (tensile stress curves are relatively close). When compressive stress was applied, the loss values increased significantly when increasing the stress. Through comparative analysis of hysteresis loss models, those that best represent the behavior of the material used in this work are determined. A discussion about the model parameter values behavior as a function of the applied stress level was also performed.

Keywords: Magnetomechanical coupling. Non-oriented grain electrical steel. Magnetic characterization. Magnetic losses separation. Parameter values determination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Laços BH comparativos de (a) grão orientado 97 Fe 3 Si e (b) Ferro puro.....	26
Figura 2.2: Curvas de magnetização de cristais de ferro e de níquel.....	28
Figura 2.3: Fenômeno de magnetostricção: (a) Mudanças na dimensão de uma amostra em função do campo magnético H gerado pela aplicação de uma corrente i . (b) gráfico da magnetostricção em função de H	30
Figura 2.4: Comportamento dos domínios magnéticos, magnetostricção e volume do material em relação a um campo magnético aplicado de um material ferro poli cristalino.....	31
Figura 2.5: Curva de magnetostricção do Níquel e 68 Permalloy em função do campo magnético H aplicado.	32
Figura 2.6: Variação da curva de magnetização M (a) do níquel no seu estado sem tensão aplicada, com tração e com compressão de aproximadamente 69 MPa (10000 lb/in) e (b) do 68 Permalloy no seu estado sem tensão aplicada e com aproximadamente 20 MPa de tração (2840 lb/in).	33
Figura 2.7: Resultados experimentais e simulados de magnetização inicial para uma amostra de Fe-Si sob tensão de tração e compressão.....	34
Figura 2.8: Curva de magnetização (a) sem aplicação de esforços, compressão e tração de aproximadamente 55 MPa e (b) para o aço DP780 sem tensões aplicadas e tensões de tração de 25 MPa, 50 MPa, 100 MPa e 200 MPa.	35
Figura 2.9: Variação da magnetostricção λ em função da magnetização M e das direções cristalográficas de um cristal de Fe.	36
Figura 2.10: Medição de magnetostricção de uma amostra na direção transversal e longitudinal.	36
Figura 2.11: Magnetostricção de um cristal de ferro na direção [100] (a) antes de ser submetido a um campo magnético e (b) após ser submetido a H	38
Figura 2.12: Comportamento dos domínios magnéticos em função do campo magnético e uma tensão mecânica externa aplicada.	39
Figura 2.13: Exemplo de simulação de um transformador elétrico monofásico.	40
Figura 2.14: Tensão inercial radial [Pa] para uma rotação de 30000 rpm b) Razão $\mu\sigma_{ref}$ para tensão inercial (rotação de 30000 rpm) e c) Razão $\mu\sigma_{ref}$ para tensão inicial $\sigma_{zz} = -30$ MPa.....	41
Figura 2.15: Distribuição das perdas no ferro (a) sem considerar o efeito <i>shrink fitting</i> e (b) considerando esse efeito.	42
Figura 2.16: Efeito do <i>shrink fitting</i> em um motor de relutância. a) Tensão radial σ_{rr} e b) tensão transversal	43
Figura 3.1: Comportamento das perdas magnéticas.	45
Figura 3.2: Ilustração do efeito Barkhausen.	46
Figura 3.3: Chapa fina de material condutor sendo percorrido por um fluxo magnético B na direção x	49
Figura 3.4: Variação (a) das perdas por histerese e perdas excedentes e (b) parâmetro V_0 quando impostos esforços de tração e compressão.....	52
Figura 3.5: Variação do parâmetro n_0 das perdas excedentes quando aplicados esforços de diferentes níveis em tração e compressão.	52
Figura 3.6: Variação dos coeficientes de perdas por histerese (a) a_1 , (b) α_0 , (c) α_1 ; de perdas clássicas (d) a_3 , (e) α_4 , e de perdas excedentes (f) a_5 quando aplicados esforços mecânicos de tração.....	53
Figura 3.7: Variação dos parâmetros das perdas por histerese para esforços entre 0 MPa e 530 MPa. Onde (a) refere-se aos parâmetros a_1 , (b) a α e (c) a β	54
Figura 3.8: Variação dos parâmetros dos modelos de perdas em função dos esforços de compressão aplicados nas frequências de (a) 100 Hz, 200 Hz e 1 T para K_{hyst} (b) 100 Hz e 1 T para K_{eddy} e (c) 100 Hz e 1 T para K_a	55
Figura 3.9: Variação dos valores dos coeficientes de perdas (a) K_h , (b) K_{exc} e (c) α em função do nível de compressão para amostras com direções de corte de 0° e 90° (RD e TD, respectivamente) em induções magnéticas 0,5 T, 1,0 T e 1,5 T.	56

Figura 4.1: Foto da bancada comercial <i>Brockhaus</i> ® MPG200 (1.) com os módulos <i>Ring Core</i> (2.), Epstein (4.), SST (5.) e computador (3.) em destaque.....	60
Figura 4.2: Foto do módulo SST da <i>Brockhaus</i> ® MPG200.....	60
Figura 4.3: Foto da bancada magnetomecânica na versão atual utilizada para realizações dos ensaios.....	63
Figura 4.4: Foto de parte da bancada magnetomecânica, na qual é mostrada a configuração do SST modificado sem a blindagem eletromagnética externa.....	63
Figura 4.5: Foto da caixa de filtragem e amplificação dos três canais dos sensores de campo.....	64
Figura 4.6: Extrapolação linear de valores de campos magnéticos experimentais em um sistema com e sem blindagem.....	71
Figura 4.7: Diagrama de blocos da metodologia de ensaios da bancada magnetomecânica.....	73
Figura 4.8: Valores dos parâmetros do modelo 2 de perdas por histerese para as três amostras obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforço para as amostras (a) K_h 0RD, (b) K_h 45DD, (c) K_h 90TD, (d) α_0 0RD, (e) α_0 45DD, (f) α_0 90TD, (g) α_l 0RD, (h) α_l 45DD e (i) α_l 90TD.....	151
Figura 5.1: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° em 0 MPa.....	79
Figura 5.2: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° em 20 MPa de tração.....	80
Figura 5.3: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° em 20 MPa de compressão.....	80
Figura 5.4: Laços BH a 50Hz e 1 T das amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.....	81
Figura 5.5: Laços BH em 50 Hz e 1 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra longitudinal.....	83
Figura 5.6: Laços de histerese em 1 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra diagonal.....	84
Figura 5.7: Laços BH em 100 Hz e 0,8 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra transversal.....	85
Figura 5.8: Variação do campo coercitivo em função do esforço mecânico aplicado nas amostras (a) longitudinal, (b) diagonal e (c) transversal na frequência de 1 Hz e para as induções de 1,2 T, 1,0 T, 0,8T, 0,5 T e 0,2 T.....	86
Figura 5.9: Variação do campo coercitivo em função do esforço mecânico aplicado nas amostras longitudinal, diagonal e transversal na frequência de 50 Hz e para as induções de 1 T.....	87
Figura 5.10: Variação da indução remanente em função do esforço mecânico aplicado nas amostras (a) longitudinal, (b) diagonal e (c) transversal na frequência de 1 Hz e para as induções de 1,2 T, 1,0 T, 0,8T, 0,5 T e 0,2 T.....	88
Figura 5.11: Variação da indução remanente em função do esforço mecânico aplicado nas amostras longitudinal, diagonal e transversal na frequência de 50 Hz e para as induções de 1 T.....	89
Figura 5.12: Permeabilidade magnética relativa para as amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° a 1 Hz nos níveis (a) 0 MPa, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.....	90
Figura 5.13: Permeabilidade magnética relativa a 1 Hz da amostra com direção de corte longitudinal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.....	91
Figura 5.14: Permeabilidade relativa magnética a 1 Hz da amostra com direção de corte diagonal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.....	92
Figura 5.15: Permeabilidade magnética relativa a 1 Hz da amostra com direção de corte transversal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.....	93
Figura 6.1: Perdas por histerese da amostra 0RD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.....	95
Figura 6.2: Comparação de resultados de perdas por histerese obtidos pelos métodos 1, 5 e 6 para amostra 0RD quando aplicados 20 MPa de compressão.....	97
Figura 6.3: Perdas por histerese da amostra 45DD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.....	97

Figura 6.4: Perdas por histerese da amostra 90TD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.	99
Figura 6.5: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h e (b) α , obtidos pelo modelo 1, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão das amostras ORD, 45DD e 90TD.....	101
Figura 6.6: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 e (c) α_1 , obtidos pelo modelo 2, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão das amostras ORD, 45DD e 90TD.	102
Figura 6.7: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 e (d) α_2 , obtidos pelo modelo 3, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.	103
Figura 6.8: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 e (d) α_2 , obtidos pelo modelo 4, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.	104
Figura 6.9: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 , (d) α_2 e (e) α_2 obtidos pelo modelo 4, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.	105
Figura 6.10: Comportamento dos coeficientes (a) x_1 e (b) x_2 , obtidos com o modelo 5, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.	105
Figura 6.11: Comportamento dos coeficientes, (a) x_0 , (b) x_1 , (c) x_2 , (d) x_3 , (e) x_4 , (f) x_5 e (g) x_6 , obtidos com o modelo 6, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.	106
Figura 6.12: Comportamento dos coeficientes (a) x_1 , (b) x_2 , (c) x_3 , (d) x_4 , (e) x_5 e (f) x_6 , obtidos com o modelo 6 sem x_0 , em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para ORD, 45DD e 90TD.	107
Figura 6.13: Perdas dinâmicas calculadas através do modelo W_{din} para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.	109
Figura 6.14: Valores dos coeficientes do modelo de perdas dinâmicas K_{din} para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90°.	110
Figura 6.15: Valores do expoente do modelo de perdas dinâmicas θ para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90°.	110
Figura 6.16: Valores dos coeficientes $K_{cláss}$ do modelo de perdas clássicas quando aplicados esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços mecânicos e diferenças relativas percentuais em relação ao caso de 0 MPa.	111
Figura 6.17: Comparação entre os valores de perdas excedentes para as amostras (a) ORD, (b) 45DD e (c) 90TD quando aplicados esforços de 20 MPa de tração e compressão e no caso sem aplicação de esforços.	113
Figura 6.18: Perdas excedentes para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos (0 MPa), (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão para amostras ORD, 45DD e 90TD.	114
Figura 6.19: Valores dos coeficientes de perdas excedentes K_{exc} para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas três amostras analisadas.	114
Figura 6.20: Separação de perdas para a amostra com direção de corte longitudinal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.	116
Figura 6.21: Separação de perdas para a amostra com direção de corte diagonal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.	117
Figura 6.22: Separação de perdas para a amostra com direção de corte transversal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.	118
Figura A.1: Comparação entre curvas do modelo de potência obtidos através da curva de tendência do Excel e da metodologia empregada com curvas de perdas experimentais quando aplicados esforços de compressão de (a) 10 MPa, (b) 15 MPa e (c) 20 MPa.	129

Figura A.2: Separação de perdas entre perdas dinâmicas e perdas por histerese utilizando dados de ensaios na SST da Brockhaus® e comparação com os dados fornecidos por esta bancada.	130
Figura B.1: Comparação entre perdas magnéticas de amostras com direção de 0° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® para as frequências de (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.	132
Figura B.2: Comparação entre valores de campo magnético eficaz obtidos para amostras com direção de 0° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® em (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.	132
Figura B.3: Comparação entre perdas magnéticas obtidas para amostras com direção de 90° na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® para as frequências de (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.	134
Figura B.4: Comparação entre valores de campo magnético eficaz obtidos para amostras com direção de 90° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® em (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.	134
Figura B.5: Comparações dos laços BxH em 50 Hz e 1 T das amostras longitudinal e transversal ensaiadas na bancada de esforços mecânicos e na Brockhaus®.	135
Figura B.6: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 0° para induções magnéticas de 0,5 T, 0,8 T e 1 T nos níveis de tração e de compressão aplicados.	136
Figura B.7: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 45° relativos aos valores de indução magnética de 0,5 T, 0,8 T e 1 T em níveis de tração e compressão.	137
Figura B.8: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 45° relativos aos valores de indução magnética de 0,5 T, 0,8 T e 1 T em níveis de tração e compressão.	138
Figura C.1: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte 0° (0RD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.	140
Figura C.2: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte de 45° (45DD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.	141
Figura C.3: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte de 90° (90TD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.	142
Figura D.1: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 0RD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α	145
Figura D.2: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α	145
Figura D.3: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 90TD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α	145
Figura D.4: Valores dos parâmetros K_h do modelo 1 de perdas por histerese para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforços para as amostras (a) 0RD, (b) 45DD e (c) 90TD.	148
Figura D.5: Valores dos parâmetros α do modelo 1 de perdas por histerese para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforço para as amostras (a) 0RD, (b) 45DD e (c) 90TD.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Dimensões das amostras utilizadas para medições na bancada de esforços mecânicos.....	59
Tabela 4.2: Dimensões das amostras utilizadas para medições na Brockhaus® MPG200.....	59
Tabela 6.1: Modelos de representação de perdas por histerese.....	94
Tabela 6.2: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra 0RD.....	96
Tabela 6.3: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra 0RD.....	96
Tabela 6.4: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra 45DD.	98
Tabela 6.5: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra 45DD.	98
Tabela 6.6: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra 90TD.....	100
Tabela 6.7: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra 90TD.....	100
Tabela 6.8: Relação entre tipo de perdas e metodologia de cálculo utilizada nas separações de perdas. ...	108
Tabela 6.9: Comparação entre os valores de K_{class} encontrados na separação de perdas para as amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90° quando não são aplicados esforços mecânicos (0MPa).....	112
Tabela A.1: Comparação entre parâmetros do modelo de potência ($W = K\mathbf{B}\alpha$) obtidos através da metodologia empregada e pela curva de tendência do Excel para ensaios de 1 Hz.....	128
Tabela D.1: Resumo de modelos para cada tipo de perdas e suas respectivas formulações.....	143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ e α_3	Expoentes do modelo de potência da separação das perdas	
Al	Alumínio	
B	Indução magnética	[T]
B_p	Indução magnética de pico	[T]
B_r	Indução magnética remanente	[T]
C	Carbono	
Co	Cobalto	
d	Espessura da lâmina	[m]
∂	Derivada parcial	
DD	<i>Diagonal Direction</i> ou direção diagonal em português	
ΔL	Variação no comprimento do material	[m]
δ_1, δ_2 e δ_3	Cossenos diretores do vetor de magnetização de saturação	
δ_1	Cosseno do ângulo que \mathbf{M}_s faz com o vetor unitário \mathbf{i}	
δ_2	Cosseno do ângulo que \mathbf{M}_s faz com o vetor unitário \mathbf{j}	
δ_3	Cosseno do ângulo que \mathbf{M}_s faz com o vetor unitário \mathbf{k}	
E	Campo Elétrico	[V/m]
E_σ	Magnetização espontânea do domínio magnético	
f	Frequência	[Hz]
f_0	Frequência de ensaio	[Hz]
Fe	Ferro	
G	Constante do cálculo das perdas excedentes	
GNO	Grão não orientado	
GO	Grão orientado	
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos	
H	Campo magnético	[A/m]
H_c	Campo coercitivo	[A/m]
$H_{cláss}$	Parcela de campo magnético que gera perdas clássicas	[A/m]

H_{exc}	Parcela de campo magnético que gera perdas excedentes	[A/m]
H_{extrap}	Campo magnético extrapolado	[A/m]
H_h	Parcela de campo magnético que gera perdas por histerese	[A/m]
i	Corrente de excitação	[A]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
K_l	Constante de anisotropia de primeira ordem	
K_h	Constante de perdas por histerese do modelo de Steinmetz	
K_f	Constante de perdas por correntes de Foucault do modelo de Steinmetz	
L	Comprimento do material	[m]
l_m	Caminho médio magnético do circuito magnético (SST modificado)	[m]
γ_1, γ_2 e γ_3	Cossenos diretores do vetor de tensão mecânica em relação aos vetores unitários i, j e k .	
γ_1	Cosseno do ângulo que o esforço mecânico faz com o vetor unitário i	
γ_2	Cosseno do ângulo que o esforço mecânico faz com o vetor unitário j	
γ_3	Cosseno do ângulo que o esforço mecânico faz com o vetor unitário k	
M	Magnetização	[A/m]
μ	Permeabilidade magnética	
μ_{rel}	Permeabilidade magnética relativa	
μ_0	Permeabilidade magnética do ar/vácuo	
Mn	Manganês	
M_s	Magnetização de saturação	[A/m]
m_v	Massa específica	[kg/m ³]
N	Velocidade de rotação	[rpm]
n_0	Número de objetos magnéticos ativos no estado quase estático	
N_H	Número de espiras da bobina-H	

Ni	Níquel	
N_p	Número de espiras da bobina primária do SST modificado	
N_s	Número de espiras da bobina secundária do SST modificado	
P	Fósforo	
$P_{cláss}$	Perdas clássicas; Perdas por correntes induzidas; Perdas de Foucault	[W]ou [J]
P_{exc}	Perdas excedentes	[W]ou [J]
P_{fe}	Perdas no ferro	[W]ou [J]
P_h	Perdas excedentes	[W]ou [J]
P_{tot}	Perdas totais	
ρ	Densidade	[kg/m ³]
RD	<i>Rolling Direction</i> ou direção de laminação em português	
<i>rot</i>	Rotacional	
R^2	Coefficiente de determinação	
σ	Tensão mecânica	[Pa]
σ_e	Condutividade elétrica	[S]
λ	Magnetostricção	
λ_s	Magnetostricção de saturação	
λ_t	Magnetostricção transversa	
S	Enxofre	
S_t	Seção transversal da lâmina	[m] ou [mm]
S_i	Silício	
S_H	Seção da bobina-H	[mm]
SST	<i>Single Sheet Tester</i> ou teste de chapa única em português	
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos	
STQ	Soma total dos quadrados	
T	Período	[s]

TD	<i>Transverse Direction</i> ou direção transversal em português	
θ	Ângulo entre a saturação de magnetização \mathbf{J}_s	[°] ou rad
V	Volume	[m ³]
V_0	Campo magnético que rege o aumento de objetos magnéticos devido ao campo externo aplicado	[A/m]
v_H	Tensão na bobina-H	[V]
V_{RMS}	Tensão RMS na bobina secundária do SST modificado	[V]
v_s	Tensão na bobina secundária do SST modificado	[V]
W	Perdas energéticas	[J/kg] ou [J/m ³]
W_{din}	Parcela de perdas energéticas referente às perdas dinâmicas	[J/kg]
W_{exc}	Parcela de perdas energéticas referente às perdas excedentes	[J/kg]
W_h	Parcela de perdas energéticas referente às perdas por histerese	[J/kg]
W_{tot}	Perdas energéticas referentes às perdas totais	[J/kg]
$x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ e x_6	Coeficientes dos modelos polinomiais da separação de perdas	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. MOTIVAÇÃO E POSICIONAMENTO DO PROBLEMA	21
1.2. OBJETIVOS	22
1.2.1. Objetivos específicos	22
2. MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS E O FENÔMENO DE ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO	24
2.1. AÇO ELÉTRICO	25
2.1.1. Material de grão não orientado	26
2.1.2. Material de grão orientado	27
2.1.3. Anisotropia cristalina	27
2.2. ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO	29
2.2.1. Magnetostricção	29
2.2.2. Magnetostricção inversa	31
2.2.3. Magnetostricção positiva e magnetostricção negativa	32
2.2.4. Relação entre direções cristalográficas e textura de um material e a magnetostricção	35
2.2.5. Tensões mecânicas e estrutura cristalina do material	37
2.3. EXEMPLOS DE ESTUDOS DE EFEITOS DA MAGNETOSTRICÇÃO E MAGNETOSTRICÇÃO INVERSA EM NÚCLEOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	40
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	43
3. PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS	44
3.1. PERDAS POR HISTERESE	46
3.2. PERDAS DINÂMICAS	48
3.2.1. Perdas clássicas	48
3.2.2. Perdas excedentes	49
3.3. INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS MECÂNICOS NOS MODELOS DE PERDAS MAGNÉTICAS	51
4. BANCADAS DE ENSAIOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS	58
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS	58
4.1.1. Lâminas de Fe-Si	58
4.1.2. Brockhaus@MPG200	59
4.1.3. Bancada de esforços mecânicos	61
4.2. METODOLOGIA DE ENSAIO	66
4.2.1. Configuração da bancada de esforços mecânicos	66
4.2.2. Aquisição de sinais	69
4.2.3. Tratamento de dados	69

4.2.4.	Resumo da metodologia de ensaio da bancada de esforços mecânicos	71
4.3.	METODOLOGIA DE SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS.....	73
4.3.1.	Utilização da ferramenta <i>solver</i> do Excel para separação de perdas	73
5.	ENSAIOS E ANÁLISES DA INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS MECÂNICO NAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DO MATERIAL	77
5.1.	INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NOS LAÇOS DE PERDAS MAGNÉTICAS.....	79
5.1.1.	Comparação entre os laços de perdas das três amostras analisadas	79
5.1.2.	Influência de esforços mecânicos nos laços de perdas magnéticas	82
5.2.	INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NO CAMPO COERCITIVO.....	85
5.3.	INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NA INDUÇÃO REMANENTE	87
5.4.	INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NA PERMEABILIDADE RELATIVA .	89
6.	ANÁLISE DE SEPARAÇÃO DE PERDAS	94
6.1.	COMPORTAMENTO DAS PERDAS POR HISTERESE	94
6.1.1.	Representação das perdas por histerese amostra 0RD	95
6.1.2.	Representação das perdas por histerese para amostra 45DD	97
6.1.3.	Representação das perdas por histerese para amostra 90TD	99
6.1.4.	Comportamento dos valores dos parâmetros dos modelos de perdas por histerese 100	
6.2.	COMPORTAMENTO DAS PERDAS DINÂMICAS.....	108
6.2.1.	Estudo do comportamento das perdas clássicas	110
6.2.2.	Estudo do comportamento das perdas excedentes	112
6.3.	ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS TIPOS DE PERDAS EM CONJUNTO	115
7.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	119
7.1.	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	121
	REFERÊNCIAS.....	123
	APÊNDICE A – Validação da metodologia empregada para obtenção dos valores de parâmetros dos modelos de perdas magnéticas	127
	APÊNDICE B – Validação da medição da bancada magnetomecânica	131
	APÊNDICE C – Resultados da separação de perdas para lâminas com direções de corte de 0°, 45° e 90° quando submetidas a esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa e 15 MPa de tração e compressão.	139
	APÊNDICE D – Estudo preliminar de equacionamento para representação do comportamento dos parâmetros de modelos de perdas por histerese em função de esforços mecânicos.....	143

1. INTRODUÇÃO

A incessante busca pelo aprimoramento do rendimento e da eficiência das máquinas elétricas leva ao constante estudo de materiais, dentre eles os ferromagnéticos. Além disso, o desenvolvimento de ferramentas de projeto de máquinas elétricas que levem em conta efeitos e características dos materiais ferromagnéticos é um assunto de interesse tanto acadêmico quanto industrial. Por isso, investigações do comportamento de características magnéticas desses materiais como, por exemplo, perdas e permeabilidade magnética, são realizadas desde o século XIX por físicos e engenheiros.

Os estudos de fenômenos relativos aos materiais ferromagnéticos envolvidos nas operações das máquinas elétricas têm sido realizados recentemente em maior intensidade e quantidade. Pode-se citar, como exemplo, o acoplamento entre propriedades magnéticas e mecânicas. Tal acoplamento pode ser gerado pelo processo de fabricação de equipamentos elétricos, tais como corte, perfuração, empilhamento e montagem (*shrink fitting*), ou ainda durante sua própria utilização, pois existem fenômenos rotacionais que levam ao aparecimento de forças inerciais na estrutura, por exemplo.

Análises específicas que consideram o acoplamento entre as características magnetomecânicas são de interesse investigativo, visto que os efeitos mecânicos gerados por aplicações que envolvem o uso de máquinas elétricas influenciam no comportamento de propriedades magnéticas dos materiais dos núcleos.

1.1. MOTIVAÇÃO E POSICIONAMENTO DO PROBLEMA

Um trabalho recentemente elaborado no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), da Universidade Federal de Santa Catarina, (MAILHÉ, 2018), realizou a construção de uma bancada experimental que possibilita análises de características magnéticas em lâminas quando aplicados esforços mecânicos. A construção desta bancada levou em conta padrões internacionais de medição e permite a aplicação de esforços de tração e compressão. Esta bancada possibilita diversos estudos, como por exemplo, este presente trabalho.

Uma vez que se sabe que esforços mecânicos impactam, dentre outros aspectos, nas perdas magnéticas, os modelos de perdas magnéticas que descrevem o material em seu estado sem esforços, em geral, não representam de forma satisfatória o material sob influência de carregamentos mecânicos.

A escolha do tipo de material aço elétrico de grão não orientado (GNO) deve-se a sua aplicação em máquinas elétricas girantes (devido a sua característica isotrópica). Assim, os ensaios foram desenvolvidos em amostras de um mesmo material GNO estampadas em três diferentes direções (0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação) a fim de possibilitar a análise de possíveis efeitos de esforços mecânicos em características magnéticas e em função das direções de corte.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal contribuir para o avanço de estudos que relacionam os efeitos mecânicos e magnéticos em materiais ferromagnéticos para uso em equipamentos elétricos, especificamente no aspecto de separação de perdas magnéticas. Espera-se também gerar subsídios para o desenvolvimento de simulações de cálculo de campo por elementos finitos que levem em conta os efeitos magnetomecânicos no cálculo das perdas magnéticas através da variação dos parâmetros de modelos de perdas magnéticas em função da intensidade de esforços mecânicos.

1.2.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- i) Analisar propriedades magnéticas, tais como perdas, permeabilidade, indução remanente e campo coercitivo, de chapas de grão não orientado, com direções de corte de 0° , 45° e 90° em relação ao sentido de laminação, sob diferentes níveis e tipos de esforços mecânicos (tração e compressão).
- ii) Estudar, analisar e realizar processos de separação das perdas magnéticas, utilizando modelos conhecidos na literatura, tendo como base valores de perdas magnéticas medidos utilizando uma bancada que possibilita a imposição de esforços mecânicos.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo é a presente introdução.

Em seguida, é realizada uma revisão bibliográfica e, devido à complexidade e interação entre diferentes temas, ela é dividida em dois capítulos (capítulos 2 e 3, respectivamente): i) um breve resumo sobre materiais ferromagnéticos e o acoplamento magnetomecânico; ii) e uma discussão sobre processos de separação de perdas magnéticas.

No quarto capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para se obter os resultados experimentais e de análise. Tem-se, neste capítulo, uma explicação do funcionamento das bancadas de medição utilizadas e de metodologias de separação de perdas.

Nos capítulos 5 e 6, são apresentados resultados de ensaios, de caracterização magnética e de análises a partir das separações de perdas. No capítulo 5 se analisam os efeitos dos esforços mecânicos nas características magnéticas das chapas com três tipos de corte e no capítulo 6 são apresentadas análises da variação dos valores dos parâmetros de cada modelo de perdas magnética.

Finalmente são apresentadas, no capítulo 7, as conclusões e as perspectivas futuras.

2. MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS E O FENÔMENO DE ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO

Material ferromagnético é um tipo específico de material caracterizado pela facilidade de ordenamento de momentos magnéticos nos níveis atômico e molecular. Um material ferromagnético é dividido em zonas nas quais os momentos magnéticos atômicos e/ou moleculares são alinhados. Essas zonas, chamadas de domínios magnéticos, possuem uma magnetização espontânea de modo a levar um arranjo que busque a menor energia magnética no volume do material. A magnetização espontânea dos materiais ferromagnéticos tende a se alinhar ao longo das fáceis direções de magnetização determinadas pela estrutura cristalina do material, textura e forma da amostra (BOZORTH, 1978a; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007; COEY, 2010; FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006; SINNECKER, 2000). As regiões de interface dos domínios são chamadas de paredes (CULLITY; GRAHAM, 2009). Em outras palavras, os domínios magnéticos são organizados de tal maneira que um material não submetido a um campo magnético externo não apresente uma magnetização macroscópica.

Os materiais ferromagnéticos podem ser divididos entre i) materiais moles (também chamados de doces ou macios) que são fáceis de magnetizar ou desmagnetizar, como aço elétrico, ou ii) em materiais duros, os quais são de difícil magnetização ou desmagnetização, tais como ímãs permanentes (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007; CULLITY; GRAHAM, 2009; SINNECKER, 2000).

Materiais ferromagnéticos moles são formados, dentre outras composições, por ligas binárias ou ternárias de ferro Fe, cobalto Co e níquel Ni (CULLITY; GRAHAM, 2009; SINNECKER, 2000). O Fe possui uma magnetização de saturação relativamente alta, é abundante e consideravelmente barato quando comparado com o Co e Ni, e, por isso, é utilizado em larga escala apesar de possuir características como alta maleabilidade e baixa resistividade elétrica que, dependendo da aplicação, podem ser desvantajosas, e facilitar o aparecimento de correntes induzidas (SINNECKER, 2000).

Dentre os tipos de materiais ferromagnéticos existentes, serão explicitadas a seguir as características do material de estudo neste trabalho: os aços elétricos ou aços para fins elétricos.

2.1. AÇO ELÉTRICO

Aços elétricos são classificados como materiais ferromagnéticos moles. Esses se diferenciam dos materiais duros devido, principalmente, a sua alta permeabilidade (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Chapas de aço elétrico são produzidas principalmente de ligas contendo ferro, silício Si e alumínio Al em combinações, como por exemplo: Fe-Si e Fe-Si-Al. Lâminas de Fe-Si foram desenvolvidas no início do século XX e logo se tornaram amplamente utilizadas nas confecções de núcleos de transformadores, motores e geradores (CULLITY; GRAHAM, 2009; PETROVIC, 2010).

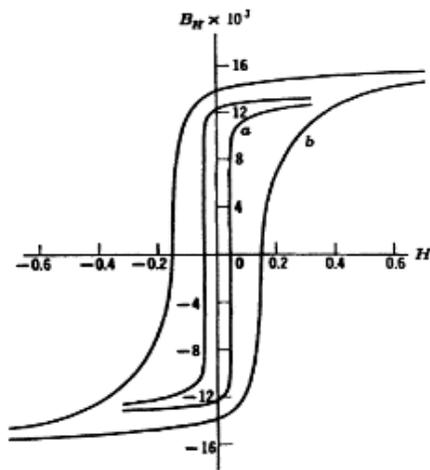
A qualidade dos aços elétricos de Fe-Si é função da quantidade de silício em sua composição. Quanto mais se adiciona Si, menores são as perdas por correntes induzidas, pois há um aumento da resistividade elétrica do material. Entretanto, devido a este incremento de silício, é ocasionada queda no valor da indução de saturação do material e reduções dos efeitos da anisotropia e magnetostricção (variação da forma ou dimensões de um material quando submetido a um campo magnético)¹ (COEY, 2010; SHIMANAKA et al., 1982).

As características requeridas na fabricação de chapas Fe-Si em geral são: i) permeabilidade e indução de saturação elevadas e ii) magnetostricção e perdas magnéticas baixas. Valores elevados de permeabilidade e de indução de saturação possibilitam a redução do tamanho das peças; as baixas perdas magnéticas diminuem a energia consumida e a baixa magnetostricção reduz a sensibilidade das propriedades magnéticas em relação às tensões mecânicas, além de diminuir as mudanças dimensionais devido à magnetização ou desmagnetização do material (CULLITY; GRAHAM, 2009; PETROVIC, 2010).

Na Figura 2.1 são apresentados os laços BH do ferro puro (laço externo nomeado de “b”) e de uma liga de Fe-Si que contém 3% de Si (97 Fe 3 Si), também conhecida como Hypersil (laço interno nomeado de “a”). Nessa figura, é possível observar os conceitos mencionados com a adição de Si: menor campo coercitivo H_c , portanto menores perdas dinâmicas (supondo que os ensaios foram realizados, por exemplo, em uma frequência comum de operação de máquinas elétricas) e, além disso, redução da indução atingida na saturação (MORRISH, 2001).

¹ Conceitos de anisotropia e magnetostricção serão aprofundados no decorrer da dissertação.

Figura 2.1: Laços BH comparativos de (a) grão orientado 97 Fe 3 Si e (b) Ferro puro.



Fonte: (MORRISH, 2001).

Os tipos de aço elétrico utilizados na generalidade dos núcleos de máquinas elétricas podem ser subdivididos em três categorias principais: materiais de grão não orientado, materiais de grão orientado e aço carbono. Os aços elétricos em geral são produzidos através de ligas de ferro e silício, enquanto que o aço carbono é composto por ligas de ferro e carbono.

2.1.1. Aço carbono

As ligas de aço carbono podem incluir também, além do carbono C, outros elementos como manganês Mn, Si, Al, enxofre S e fósforo P. Os aços carbonos podem ser classificados de acordo com a quantidade de carbono em sua composição. A principal classificação separa em três tipos: i) aço de baixo carbono, que possui por volta de 0,1% a 0,3% de carbono em sua composição; ii) aço de médio carbono com cerca de 0,3% a 0,6% de carbono e iii) aço de alto carbono, com cerca de 0,6% a 1,4% de carbono. Em geral, conforme se eleva a quantidade de carbono nas ligas desse tipo de aço, eleva-se a dureza do material e diminui-se a ductilidade (AHMAD, 2006). Neste trabalho, trabalhou-se especificamente com materiais de aço elétrico, portanto, o estudo aprofundado acerca do aço carbono não foi um objetivo deste trabalho. A seguir, são definidos os conceitos de aços elétricos de grão não orientado e de grão orientado.

2.1.2. Aço elétrico de grão não orientado

Material de grão não orientado (GNO) foi desenvolvido por Robert Hadfield em 1900 e se tornou o material mais utilizado para fabricação de máquinas de fluxo girante, tais como

geradores, motores e também alguns tipos de pequenos transformadores (CULLITY; GRAHAM, 2009; SHIMANAKA et al., 1982). Aços de grão não orientado são utilizados principalmente em motores elétricos, pois nestes equipamentos o campo magnético é aplicado paralelamente à superfície da chapa, mas varia continuamente de direção (COEY, 2010; LANDGRAF, 2016).

Chapas de aço elétrico de grão não orientado não possuem uma textura pronunciada (BOHN et al., 2004; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007). Esse material possui característica isotrópica, ou seja: apresenta, aproximadamente, as mesmas propriedades magnéticas em todas as direções (direções de corte/laminação ou direções cristalográficas, por exemplo).

2.1.3. Aço elétrico de grão orientado

Material de grão orientado (GO) foi desenvolvido por Norman Goss por volta de 1933-1934. Goss produziu um material que possui características muito melhores em uma dada direção, laminando-o após resfriamentos e recozimentos intermediários. Esta direção é chamada de direção de laminação, e nela estão alinhados os eixos de fácil magnetização do material. Esse resultado foi possível devido a uma segunda cristalização que não ocorre quando não se realizam os procedimentos específicos de resfriamentos e recozimentos antes da laminação (COEY, 2010; CULLITY; GRAHAM, 2009).

Material GO geralmente é utilizado em transformadores, nos quais o corte e a montagem das lâminas devem ser projetados para que o fluxo magnético aplicado esteja paralelo à direção de laminação das chapas (COEY, 2010; LANDGRAF, 2016).

A principal característica desse material é, portanto, sua anisotropia magnética, ou seja, não possui as mesmas propriedades magnéticas dependendo da direção cristalográfica (CULLITY; GRAHAM, 2009). Em chapas típicas de aço silício de grão orientado, a direção de fácil magnetização é ao longo de sua direção de laminação (*Rolling Direction* - RD - em inglês) e sua direção de difícil magnetização é em aproximadamente 55° em relação à direção de laminação (CHWASTEK et al., 2015; EMURA et al., 2001; LIU; SHIRKOOHI, 1993).

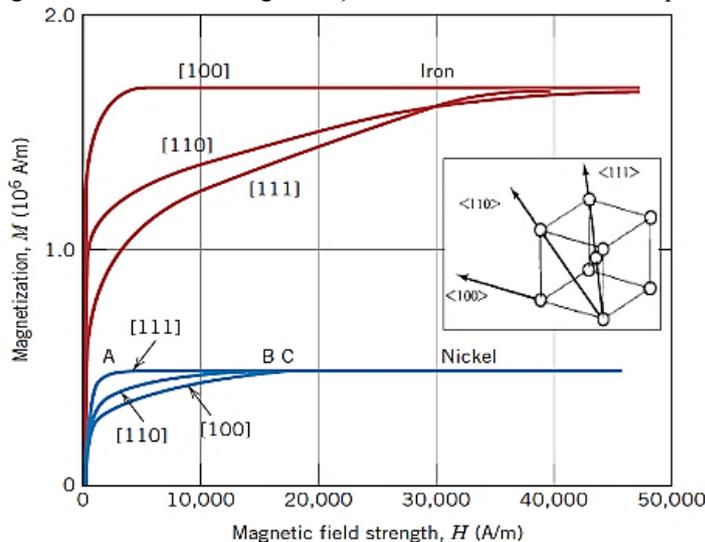
2.1.4. Anisotropia cristalina

Como mencionado, a diferença marcante entre os materiais de grão orientado e de grão não orientado é sua anisotropia devido à textura. Isto é, o comportamento global dos aços GNO é isotrópico e eles não possuem uma textura pronunciada; enquanto os aços de GO são anisotrópicos e possuem uma textura pronunciada. Mas, sabe-se também que tanto os aços

GO quanto os GNO possuem anisotropia cristalina. Nesta seção é apresentada uma breve explicação sobre anisotropia cristalina.

Exemplos de anisotropia cristalina são apresentados na Figura 2.2, onde estão destacadas as direções de fácil, média e difícil magnetização de cristais de ferro e de níquel, e suas respectivas curvas de magnetização. Um cristal possui direções $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 100 \rangle$, representadas pelas setas em destaque na Figura 2.2. Observa-se nesta figura que as curvas de magnetização do ferro (curvas na cor vermelha) se alteram. Para o ferro as direções de fácil, média e difícil magnetização são $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$, respectivamente. Já para o níquel (curvas na cor azul), as direções de fácil, média e difícil magnetização são $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ e $\langle 100 \rangle$, respectivamente.

Figura 2.2: Curvas de magnetização de cristais de ferro e de níquel.



Fonte: Modificado de (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2007).

As curvas de magnetização do ferro e do níquel variam notavelmente com suas direções cristalográficas. Esta propriedade é intrínseca ao material. Porém, existem outros tipos de anisotropia, como por exemplo, a anisotropia de origem mecânica que é gerada a partir de esforços aplicados no material.

Visto que a magnetização possui comportamentos diferentes gerados por influência da anisotropia, como mostrado nos exemplos da Figura 2.2, nota-se a importância de levar-se em conta os efeitos da anisotropia no material quando se realiza o projeto, a modelagem e/ou o dimensionamento de máquinas elétricas. Seja esta anisotropia de origem cristalográfica, o que implica na necessidade de conhecer o tipo de material utilizado (GNO ou GO, por exemplo), ou ainda, o conhecimento de outros tipos de anisotropia que podem modificar as características dos materiais durante a fabricação ou utilização de equipamentos elétricos.

Neste trabalho, serão analisadas chapas de Fe-Si de grão não orientado que, como mencionado anteriormente, é amplamente utilizado pela indústria na confecção de equipamentos elétricos que possuem campos rotativos. A resposta desse material será analisada em função da direção de corte e dos esforços mecânicos externos aplicados, para observar possíveis impactos das tensões mecânicas na isotropia do material.

A seguir, será abordado o conceito de acoplamento magnetomecânico que é fundamental para o entendimento dos resultados que serão observados no decorrer da dissertação.

2.2. ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO

Acoplamento magnetomecânico é o nome dado à alteração das características geométricas, tais como largura e/ou espessura de um material quando sofrem influência de um campo magnético, ou das características magnéticas, por exemplo, permeabilidade e perdas, quando é aplicado um esforço mecânico. Tais efeitos de acoplamento magnetomecânico são chamados, respectivamente, de magnetostricção e magnetostricção inversa (ou Efeito Villari), e serão detalhados ao longo deste capítulo.

2.2.1. Magnetostricção

Em 1842, Joule descobriu que as dimensões de um volume de uma substância podem ser alteradas quando submetidas a um campo magnético. Este efeito foi observado por ele quando uma barra de ferro teve seu comprimento aumentado após ser magnetizada. A razão do alongamento ΔL (ou encolhimento em outros casos) sofrido pelo material pelo seu comprimento inicial L é chamada de magnetostricção λ (2.1). Quando o valor de λ é obtido na saturação magnética, recebe um nome próprio de magnetostricção de saturação λ_s (BOHN, 2005; CULLITY; GRAHAM, 2009; LEE, 1955).

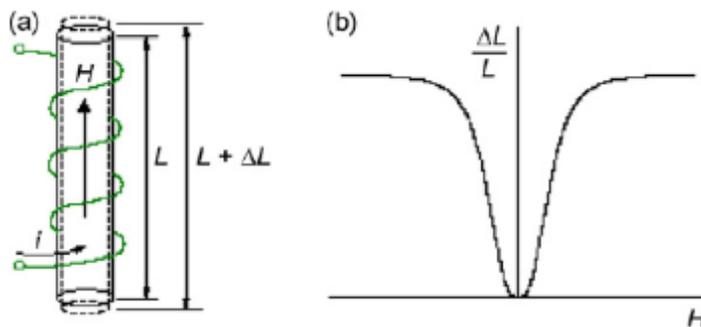
$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

O aumento do comprimento ocorre na direção do campo magnético e, geralmente, decresce na direção perpendicular, pois o volume do material permanece (aproximadamente) constante, isto é, uma expansão longitudinal deve vir acompanhada de uma contração transversal (BOHN, 2005; CULLITY; GRAHAM, 2009; EKREEM et al., 2007; LEE, 1955). Este fenômeno de contração na direção perpendicular ao campo é denominado por magnetostricção transversa λ_t e dado por (2.2).

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2} \quad (2.2)$$

Na Figura 2.3(a), tem-se uma representação de uma barra cilíndrica de material ferromagnético envolvida por um condutor percorrido por uma corrente alternada i , gerando um campo magnético H de sentido apresentado na figura. Na linha pontilhada, tem-se uma representação do comportamento quando o campo não é nulo (a barra desenhada com a linha cheia indica a sua dimensão quando o campo é nulo), no qual se observa um aumento no comprimento ΔL na direção longitudinal (mesma direção de variação de H) e uma redução no seu diâmetro (direção transversal ao campo magnético). A barra sofre alterações em seu comprimento longitudinal conforme apresenta a curva da magnetostricção λ na Figura 2.3(b) em função do campo magnético. Para elevados valores de campo magnético, na região de saturação do material, a magnetostricção λ praticamente não varia. Ademais, o sinal de λ não se modifica, ainda que seja aplicado um campo magnético no sentido contrário. Será visto adiante que a magnetostricção pode ser classificada como positiva ou negativa (pág. 31).

Figura 2.3: Fenômeno de magnetostricção: (a) Mudanças na dimensão de uma amostra em função do campo magnético H gerado pela aplicação de uma corrente i . (b) gráfico da magnetostricção em função de H .



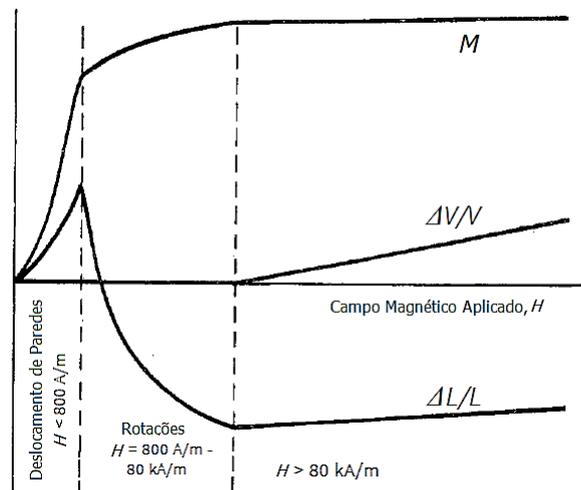
Fonte: (EKREEM et al., 2007)

2.2.1.1. Comportamento global dos efeitos no material em relação ao campo magnético aplicado

Conforme a intensidade do campo magnético aplicado, há variações nos comportamentos da magnetostricção e do volume, pois no processo de magnetização se tem movimentação das paredes de domínio e rotações dos domínios magnéticos, proporcionando efeitos distintos. Para auxiliar no entendimento desses comportamentos, apresentam-se as curvas de comportamento do material ferro poli cristalino na Figura 2.4. Em relação à magnetostricção, pode-se observar na Figura 2.4 que ocorre um aumento (variação de comprimento positivo) no comprimento do material em intensidades até cerca de 800 A/m de campo magnético (aproximadamente no início do "joelho" da curva de magnetização). Nesta

faixa ocorre predominantemente o movimento das paredes dos domínios magnéticos. Nesta avaliação de Lee, as rotações de domínio ocorrem preferencialmente em amplitudes de campo magnético entre cerca de 800 A/m e 80 kA/m. Nesta faixa, ocorre uma diminuição do comprimento deste material (vide curva $\Delta L/L$ na Figura 2.4). Observando a curva de magnetização M , os valores de campos magnéticos entre 800 A/m e 80 kA/m equivalem à região de "joelho", onde há predominantemente o fenômeno de rotação de domínios. Quando o processo de rotação de domínios finaliza, inicia-se uma expansão do material acompanhada de um aumento² relativamente pequeno do volume, que até então permanecia constante (vide curva $\Delta V/V$ na Figura 2.4).

Figura 2.4: Comportamento dos domínios magnéticos, magnetostricção e volume do material em relação a um campo magnético aplicado de um material ferro poli cristalino.



Fonte: Modificado de (LEE, 1955).

2.2.2. Magnetostricção inversa

O fenômeno da magnetostricção, em geral, não induz grandes deformações. Tem-se como valores típicos para λ_s a faixa de $10^{-5} \sim 10^{-6}$. Apesar de o efeito magnetostritivo ser relativamente pequeno, a existência deste fenômeno indica que tensões mecânicas, internas ou externas, podem alterar a organização dos domínios magnéticos e atuar como fontes de anisotropia, isto é, podem alterar propriedades importantes do material como permeabilidade (se atinge uma indução magnética maior ou menor com um mesmo campo magnético aplicado) e indução remanente B_r (CULLITY; GRAHAM, 2009; JILES, 1995; LEE, 1955; MORRISH, 2001; VANDEVELDE; MELKEBEEK, 2002).

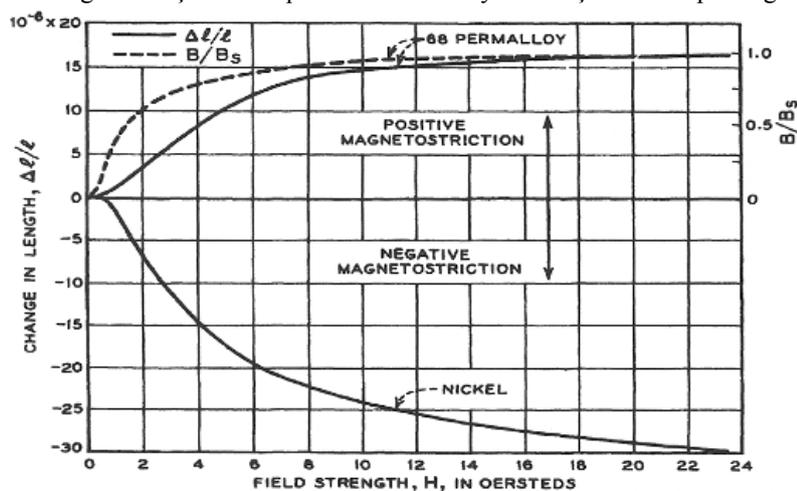
² Este aumento ocorre, conforme observado nesta figura, para valores de campo magnético extremamente elevados (neste caso, para $H > 80$ kA/m). Este fenômeno é chamado de magnetostricção forçada (*forced magnetostriction*). Os valores de campo magnético aplicados nos ensaios realizados, talvez cheguem próximos do início deste fenômeno. Mas, neste trabalho, o volume do material é considerado constante.

Como dito anteriormente, a alteração da resposta do material em função da aplicação de esforços mecânicos é chamada de magnetostricção inversa ou efeito Villari (CULLITY; GRAHAM, 2009). Este acoplamento, que gera alterações comportamentais do ponto de vista das características magnéticas do material analisado, é o que será estudado neste trabalho. Também como já mencionado, além da classificação quanto ao acoplamento em si (magnetostricção ou magnetostricção inversa), pode-se realizar outra classificação mais específica em função do comportamento do material ao possuir uma magnetostricção positiva ou negativa. A seguir serão elucidados os conceitos de magnetostricção positiva e magnetostricção negativa.

2.2.3. Magnetostricção positiva e magnetostricção negativa

A “reação” de cada material a esforços mecânicos pode ser diferente. Possuir uma magnetostricção negativa indica uma contração do material ao se aplicar um campo magnético e, de maneira contrária, a classificação de um material com magnetostricção positiva indica uma expansão (BOZORTH, 1978b). Na Figura 2.5, são apresentadas curvas de magnetostricção de dois materiais tipicamente empregados em estudos e aplicações de materiais ferromagnéticos: o níquel e o 68 Permalloy (68 Ni-Fe), os quais possuem magnetostricção negativa e positiva, respectivamente. Na Figura 2.5, quando se aumenta a intensidade de campo magnético aplicado, os valores de λ (eixo horizontal) são positivos para o 68 Permalloy, enquanto que, para os do níquel, são negativos.

Figura 2.5: Curva de magnetostricção do Níquel e 68 Permalloy em função do campo magnético H aplicado.

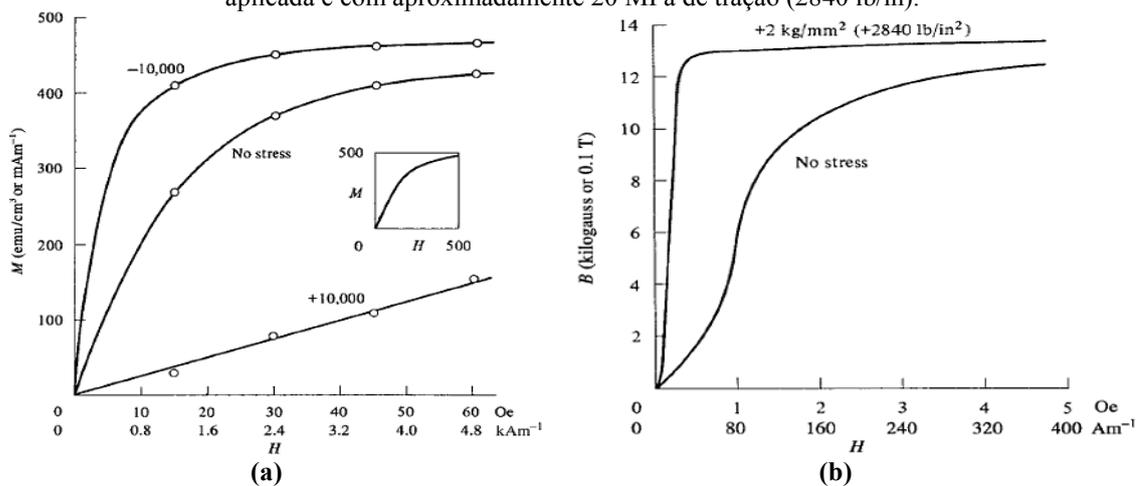


Fonte: (BOZORTH, 1978a)

Também é possível interpretar essa classificação em relação a suas características magnéticas: materiais com magnetostricção positiva demonstram uma melhora no seu comportamento magnético quando submetidos a esforços de tração e uma degradação quando

submetidos a esforços de compressão. Já os materiais com magnetostricção negativa apresentam uma deterioração em suas características magnéticas quando submetidos à tração e uma melhora quando aplicados esforços de compressão (CULLITY; GRAHAM, 2009; MAILHÉ, 2018; MORRISH, 2001). Na Figura 2.6 são apresentadas as curvas de magnetização para (a) o níquel e para (b) o 68 Permalloy. Na Figura 2.6(a), no comportamento da magnetização do níquel, nota-se que um esforço de tração de 10.000 lb/in² (equivalente a aproximadamente 69 MPa) proporciona um decréscimo significativo da permeabilidade. Por outro lado, um esforço de compressão com a mesma intensidade (-10.000 lb/in²) propicia uma melhora considerável. Na Figura 2.6(b), verifica-se a melhora da permeabilidade magnética do 68 Permalloy quando aplicada uma tração de 2840 lb/in² (aproximadamente 20 MPa).

Figura 2.6: Variação da curva de magnetização M (a) do níquel no seu estado sem tensão aplicada, com tração e com compressão de aproximadamente 69 MPa (10000 lb/in) e (b) do 68 Permalloy no seu estado sem tensão aplicada e com aproximadamente 20 MPa de tração (2840 lb/in).

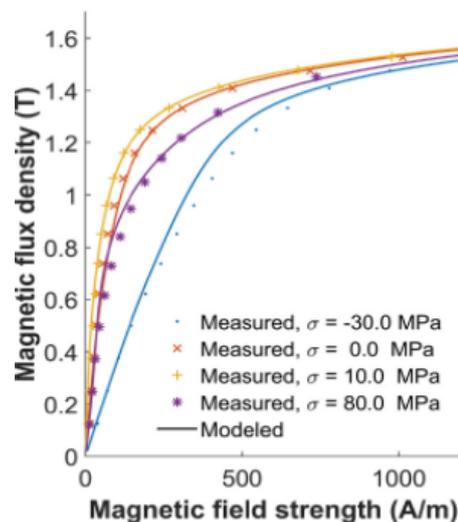


Fonte: (CULLITY; GRAHAM, 2009)

Estes comportamentos (presentes em diversos materiais) que alteram, por exemplo, a permeabilidade magnética, são complexos e sua classificação em apenas duas categorias simplifica bastante a questão, pois um material pode apresentar uma melhora ou uma degradação em suas características magnéticas em uma faixa de esforços. Materiais com magnetostricção positiva, por exemplo, podem apresentar uma melhora para esforços pequenos de tração e na medida em que estes esforços aumentam em intensidade, a resposta magnética do material degrada (CULLITY; GRAHAM, 2009; MAILHÉ, 2018). Tal comportamento pode ser observado pela comparação das curvas da Figura 2.7. Nesta figura, são mostrados resultados de medições experimentais e simulação de uma amostra de Fe-Si de grão não orientado (M400-50A) realizados por Aydin (AYDIN et al., 2017). Esta amostra foi

caracterizada em seu estado neutro (sem aplicação de esforços mecânicos externos), submetida a esforços de tração em 10 MPa e 80 MPa e de esforços de compressão a 30 MPa. O efeito complexo mencionado acima é observado com uma melhora na curva de magnetização para uma tensão aplicada de 10 MPa (curva na cor amarela) em relação à condição sem esforço (curva na cor laranja). Mas, quando são aplicados 80 MPa, há um decréscimo da permeabilidade conforme a curva de magnetização na cor roxa.

Figura 2.7: Resultados experimentais e simulados de magnetização inicial para uma amostra de Fe-Si sob tensão de tração e compressão.

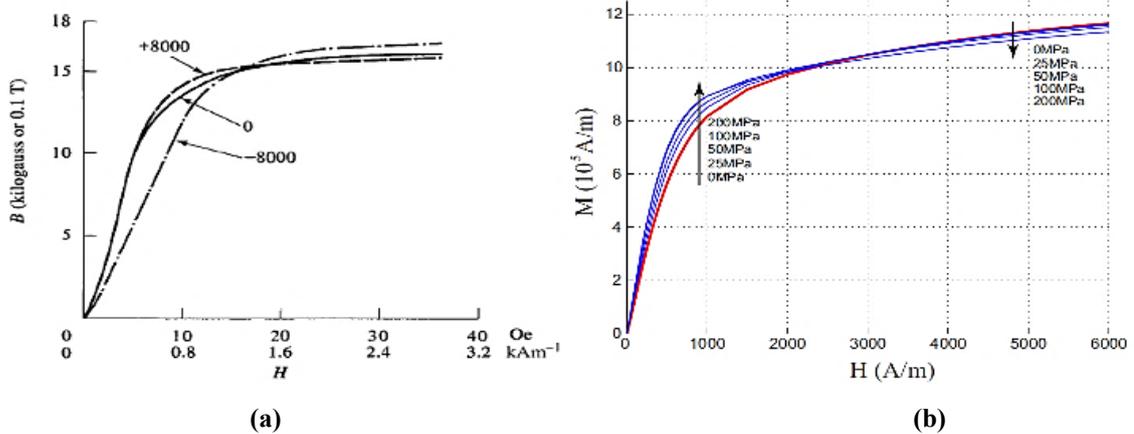


Fonte: (a) (AYDIN et al., 2017)

Além de apresentarem um comportamento complexo em função de alterações na intensidade dos esforços mecânicos, pode ainda existir uma inversão no seu comportamento global em função da intensidade do campo magnético aplicado mantendo um mesmo nível de tensão mecânica. Por exemplo, na Figura 2.8, tem-se curvas de magnetização de um material (a) sem tensões e com esforços de tração e compressão, e (b) sem tensões e apenas com esforços de tração. Na Figura 2.8(a), para a curva de magnetização com a aplicação de uma tensão de tração de 8000 lb/in² (equivalente a aproximadamente 55 MPa), observa-se que, até cerca de 1,6 kA/m se confunde ou está acima da curva sem esforços mecânicos (o que equivale dizer que possui uma permeabilidade semelhante ou melhor). Mas, após cerca de 1,6 kA/m, a curva passa a ficar abaixo da curva sem esforços mecânicos (o que equivale dizer que sua permeabilidade diminuiu). Para a situação de esforço de compressão de mesma intensidade, nota-se justamente um comportamento contrário ao da tração. O comportamento obtido por simulação do aço DP780 para esforços de 0 MPa, 25 MPa, 50 MPa, 100 MPa e 200 MPa é apresentado na Figura 2.8(b). O comportamento é semelhante ao da comparação

da curva obtida com tração e sem esforços na Figura 2.8(a). A diferença entre as curvas aumenta com o aumento da intensidade de esforços de tração.

Figura 2.8: Curva de magnetização (a) sem aplicação de esforços, compressão e tração de aproximadamente 55 MPa e (b) para o aço DP780 sem tensões aplicadas e tensões de tração de 25 MPa, 50 MPa, 100 MPa e 200 MPa.

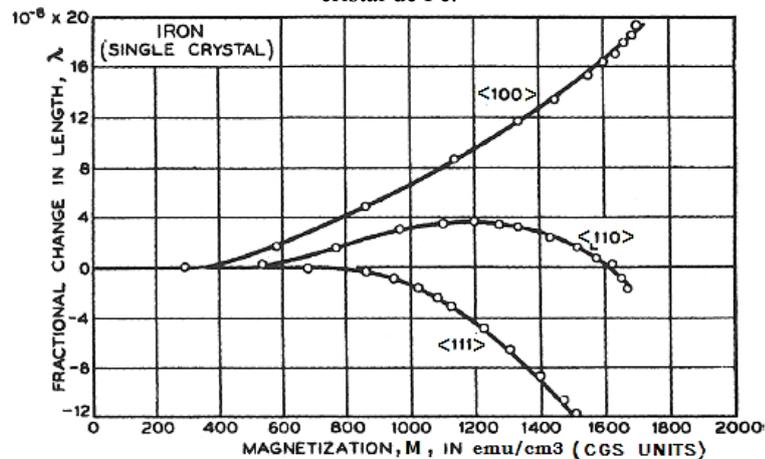


Fonte: (a) (CULLITY; GRAHAM, 2009) e (b) (HUBERT; LAZREG, 2017)

2.2.4. Relação entre direções cristalográficas e textura de um material com a magnetostricção

A relação da magnetostricção com as direções cristalográficas e com a textura do material é um aspecto também estudado pelos pesquisadores. Semelhante ao comportamento da magnetização para um cristal de ferro, valores da magnetostricção λ também se alteram em função da direção cristalográfica do grão. A Figura 2.9 apresenta curvas da magnetostricção λ em função da intensidade da magnetização M para diferentes direções cristalográficas. Comparando as três curvas relativas às três direções cristalográficas, os valores de magnetostricção são próximos até cerca de 300 emu/cm^3 (cerca de 300 kA/m). Após esse valor, a magnetostricção aumenta consideravelmente para a direção de fácil magnetização $\langle 100 \rangle$, decresce na direção de difícil magnetização $\langle 111 \rangle$, e para a direção de média facilidade de magnetização $\langle 110 \rangle$ apresenta um comportamento que o material se expande e depois se contrai.

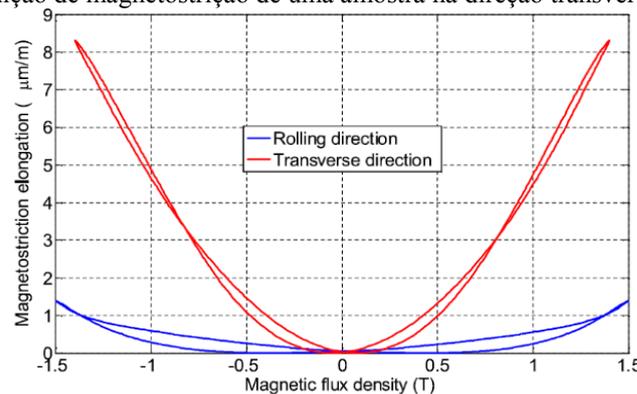
Figura 2.9: Variação da magnetostricção λ em função da magnetização M e das direções cristalográficas de um cristal de Fe.



Fonte: Modificado de (BOZORTH, 1978b).

Além da influência da magnetostricção nas direções cristalográficas do material. Pode-se avaliar a variação da magnetostricção em relação à textura do material. Na Figura 2.10, apresenta-se um exemplo da influência da textura do material em λ em um material de grão orientado. São apresentadas duas curvas de magnetostricção com efeito histerético, uma para magnetização na direção longitudinal (RD) e outra para a direção transversal (TD - *transverse direction*). As curvas foram obtidas em uma frequência de 50 Hz. Nota-se, nestes resultados de medição realizados por Belahcen (BELAHCEN et al., 2015), que chega a haver diferenças entre valores de magnetostricção na ordem de seis vezes maiores na direção transversal quando comparados à longitudinal.

Figura 2.10: Medição de magnetostricção de uma amostra na direção transversal e longitudinal.



Fonte: (BELAHCEN et al., 2015)

Com estes exemplos apresentados, chama-se a atenção para os efeitos e comportamentos distintos da magnetostricção em função da anisotropia. Ademais, com os conhecimentos que se tem atualmente, a relação entre magnetostricção e anisotropia apresenta certo grau de complexidade, o que demanda desenvolvimento de pesquisas multidisciplinares. Apesar de fazer parte dos objetivos deste presente trabalho, não se tem a pretensão de

aprofundá-los na sua complexidade, pois este trabalho procura obter subsídios, metodologias e modelos macroscópicos com valores de seus parâmetros para serem aplicados em programas de simulação numérica, principalmente enfocando as perdas magnéticas. Existem outros fatores que afetam a magnetostrição como, por exemplo, a temperatura e a composição das ligas do material (LEE, 1955), porém não serão abordadas neste trabalho.

2.2.5. Tensões mecânicas e estrutura cristalina do material

A dependência das características magnéticas em relação ao esforço mecânico pode ser tratada em termos da energia associada entre a tensão mecânica e a direção de magnetização espontânea do domínio magnético E_σ conforme (2.3), onde θ é o ângulo entre a saturação de magnetização \mathbf{M}_s e a tensão σ . Esta equação é válida para um cristal cúbico e quando a magnetostrição é isotrópica (BOZORTH, 1978b; CULLITY; GRAHAM, 2009).

$$E_\sigma = \frac{3}{2} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta \quad (2.3)$$

Considerando que o valor da magnetostrição em um cristal varia com determinada direção, E_σ é dado pela equação (2.4). Nesta equação, δ_1 , δ_2 e δ_3 são cossenos diretores³ do vetor de magnetização \mathbf{M}_s ; e γ_1 , γ_2 e γ_3 são os cossenos diretores do vetor de tensão mecânica; λ_{100} e λ_{111} são os valores de λ nas direções $\langle 100 \rangle$ e $\langle 111 \rangle$, respectivamente, e K_1 é a constante de anisotropia de primeira ordem. As deduções de (2.3) e (2.4) provêm de cálculos complexos com tensores, não tratadas nesta dissertação, mas podem ser encontradas nas referências (CULLITY; GRAHAM, 2009; LEE, 1955).

$$E_\sigma = K_1(\delta_1^2 \delta_2^2 + \delta_2^2 \delta_3^2 + \delta_3^2 \delta_1^2) - \frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma (\delta_1^2 \gamma_1^2 + \delta_2^2 \gamma_2^2 + \delta_3^2 \gamma_3^2) - 3 \lambda_{111} \sigma (\delta_1 \delta_2 \gamma_1 \gamma_2 + \delta_2 \delta_3 \gamma_2 \gamma_3 + \delta_3 \delta_1 \gamma_3 \gamma_1) \quad (2.4)$$

Esta modelagem por (2.4) indica que a energia no material é função da tensão mecânica e das direções cristalográficas de magnetização.

2.2.5.1. Comportamento dos domínios magnéticos em função de um campo magnético e uma tensão mecânica aplicada.

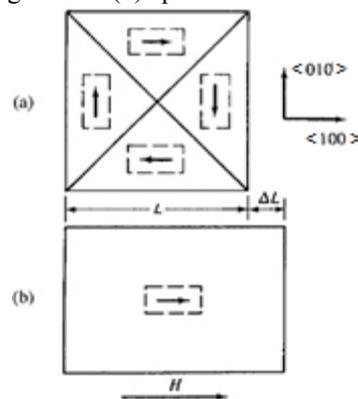
Os efeitos magnetomecânicos têm influência na organização dos domínios do material, ou seja, na adequação do comportamento energético dos domínios. Sabe-se que o movimento das paredes de domínios de 180° (180° em relação à magnetização) não geram efeitos de magnetostrição, mas apenas o deslocamento das paredes de domínios diferentes de

³ Dado um vetor \mathbf{A} , cossenos diretores deste vetor são os cossenos de seus ângulos diretores (ângulos que \mathbf{A} forma com as direções \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k}).

180° (*non-180°* em inglês) que, no caso de um grão de ferro, equivalem a paredes de domínio de 90° (CULLITY; GRAHAM, 2009; JILES, 1995). A rotação de um vetor de magnetização de saturação M_s de um domínio produz uma mudança dimensional, já que a magnetostricção espontânea depende da direção do vetor M_s relativo ao eixo do cristal. Em um caso geral de um cristal sendo magnetizado em uma direção diferente da de fácil magnetização, o processo irá envolver movimento de paredes de 180° e 90°; e rotação de domínios (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Na Figura 2.11 é mostrado um esquema do comportamento da estrutura de um grão (cristal) de ferro que, quando submetido a um campo magnético horizontal (direção $\langle 100 \rangle$), resulta em um alongamento ΔL . Nesta figura, o cristal tem comprimento inicial L . Na Figura 2.11(a), os domínios do material estão arranjados na condição de menor energia (isto é, magnetizados em suas direções de fácil magnetização). Após a imposição de um campo magnético externo H de direção $\langle 100 \rangle$, como identificado na Figura 2.11(b), o material apresenta uma magnetização final de mesma direção do campo. Neste processo houve rotação dos vetores de magnetização de domínios, e causou uma modificação de alongamento ΔL no comprimento do material.

Figura 2.11: Magnetostricção de um cristal de ferro na direção $\langle 100 \rangle$ (a) antes de ser submetido a um campo magnético e (b) após ser submetido a H .



Fonte: Modificado de (CULLITY; GRAHAM, 2009)

A Figura 2.12 apresenta outro exemplo esquemático da literatura (R. M. Bozorth, 1978), onde os domínios sofrem influência de esforços de compressão e tração. Nesta figura, os quadrados representam domínios magnéticos e os círculos representam a direção resultante da magnetização no material. As situações da figura são para dois tipos de materiais, um com magnetostricção positiva (Permalloy) e outro com magnetostricção negativa (níquel), e são descritas a seguir:

- Figura 2.12(a): a configuração representa o estado desmagnetizado dos materiais e sem nenhum esforço aplicado;

- Figura 2.12(b): foram aplicadas tração no Permalloy e compressão no níquel. As magnetizações dos domínios se alinham na direção da tensão aplicada;

- Figura 2.12(c): foram aplicadas compressão no Permalloy e tração no níquel. As magnetizações dos domínios se alinham na direção perpendicular da tensão aplicada;

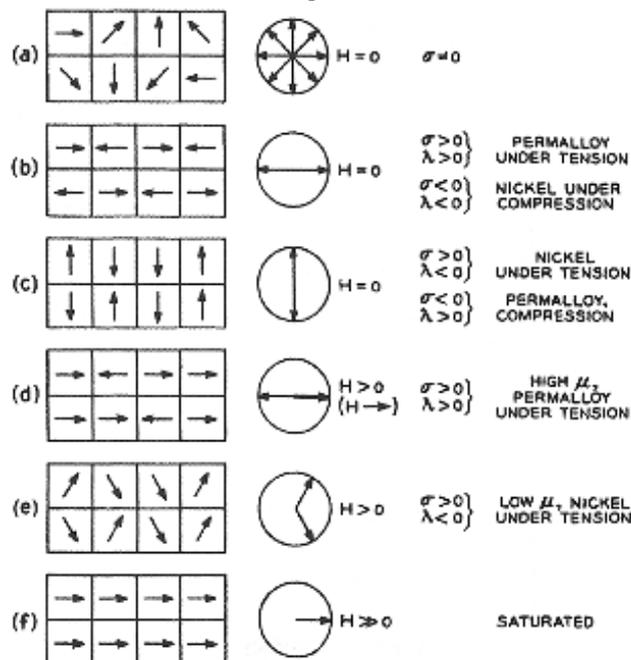
- Figura 2.12(d): foi aplicada tração no Permalloy (material com relativa alta permeabilidade e magnetostricção positiva) e um campo magnético colinear, mas sem atingir a saturação do material. As magnetizações dos domínios magnéticos se orientam no sentido deste campo, mas alguns deles continuam tendo sentido contrário ao campo;

- Figura 2.12(e): foi aplicada tração no níquel (material com relativa baixa permeabilidade e magnetostricção negativa) e um campo magnético colinear, mas sem atingir a saturação do material. As magnetizações dos domínios magnéticos tendem a se orientar no sentido deste campo, mas não colineares ao campo;

- Figura 2.12(f): Aplica-se um campo magnético suficientemente elevado para atingir a saturação. Os domínios magnéticos rotacionam totalmente na direção deste campo magnético aplicado, independentemente do tipo de material e do sentido do esforço aplicado.

Segundo estes resultados apresentados por (BOZORTH, 1978b), conforme o tipo do material, o sentido de aplicação da tensão e da intensidade e sentido de aplicação do campo magnético, os domínios tem um comportamento característico de magnetização.

Figura 2.12: Comportamento dos domínios magnéticos em função do campo magnético e uma tensão mecânica externa aplicada.

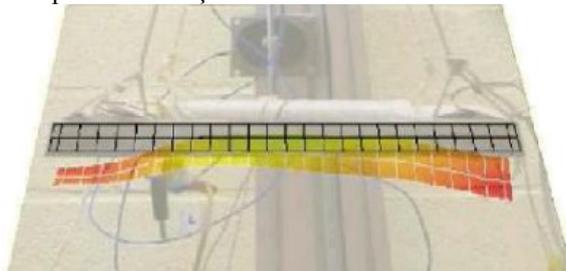


Fonte: (BOZORTH, 1978b)

2.3. EXEMPLOS DE ESTUDOS DE EFEITOS DA MAGNETOSTRIÇÃO E MAGNETOSTRIÇÃO INVERSA EM NÚCLEOS DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Diversos trabalhos existentes na literatura⁴ vêm estudando os efeitos da magnetostricção e magnetostricção inversa em núcleos magnéticos de equipamentos elétricos, podendo-se citar máquinas girantes e transformadores. Há trabalhos realizados através de simulações numéricas, como cálculo de campos por elementos finitos, e/ou experimentalmente. Na Figura 2.13, tem-se um exemplo de um resultado de simulação numérica da magnetostricção de um transformador monofásico (BELAHCEN et al., 2015). Sem excitação, a superfície do núcleo é representada pelo retângulo na cor cinza. Quando ocorre a excitação, este retângulo apresenta magnetostricção, sendo que o deslocamento máximo encontrado foi de uma magnetostricção de $0,40 \mu\text{m/m}$ (corresponde à região vermelha mais escura). Nota-se que deformação nesta estrutura não foi uniforme e, segundo os autores, deve-se principalmente à estrutura de suporte e à flexão das chapas elétricas.

Figura 2.13: Exemplo de simulação de um transformador elétrico monofásico.



Fonte: (BELAHCEN et al., 2015)

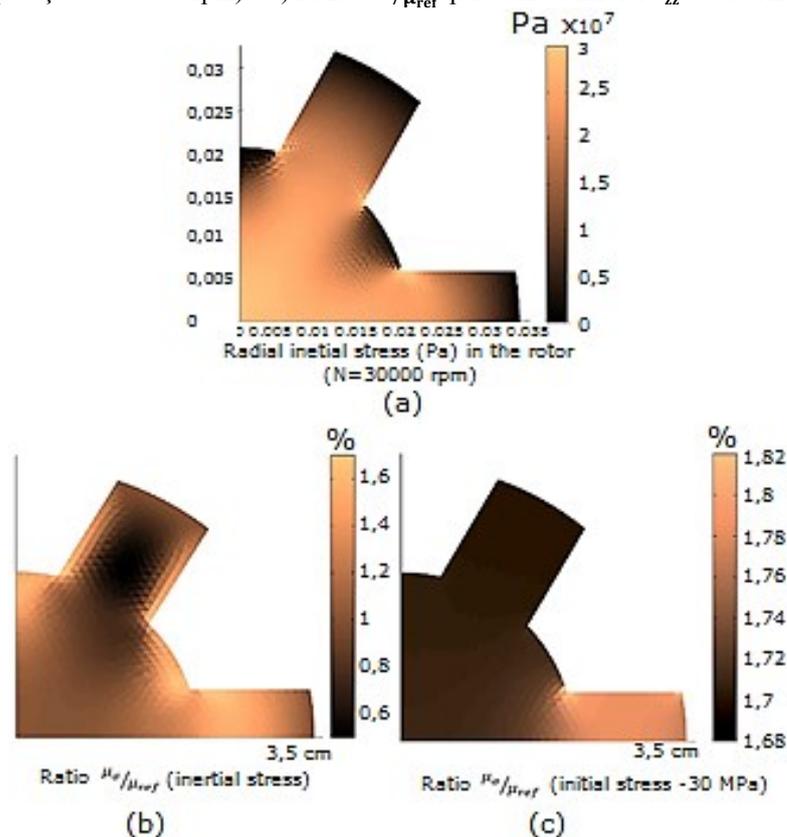
Na referência (BERNARD et al., 2011) são analisadas as influências de carregamentos mecânicos aplicados em um motor síncrono de relutância, fazendo-se distinção entre esforços causados pelas forças ocasionadas por processos manufaturados (esforços residuais que são provenientes do processo de fabricação de máquinas elétricas, tais como corte, perfuração, empilhamento, soldagem ou montagem (por exemplo *shrink fitting*⁵)) e por forças operacionais (esforços inerciais - geralmente forças centrífugas) que são ocasionados devido à rotação do motor; tensões mecânicas devido à magnetostricção causadas pela pressão presente no eixo ou na estrutura da máquina; tensões induzidas pelas forças magnéticas que são principalmente radiais) que aparecem devido à utilização do equipamento. Na Figura

⁴ (BELAHCEN et al., 2015; BERNARD et al., 2011; BERNARD; DANIEL, 2015; DAIKOKU et al., 2005; KAI et al., 2011, 2012; MIYAGI et al., 2009; PENIN et al., 2015; SOMKUN; MOSES; ANDERSON, 2009; YAMAZAKI; MUKAIYAMA; DANIEL, 2018)

⁵ Este termo geralmente é utilizado em inglês, mas pode ser traduzido por fixação do eixo do rotor ou do estator na carcaça por contração.

2.14, tem-se os valores simulados em (BERNARD et al., 2011) para um motor síncrono de relutância. A Figura 2.14(a) mostra a distribuição dos valores de tensão radial em 1/4 do rotor quando o motor está com rotação de 30000 rpm. Para este caso estudado, os valores de tensão no rotor do motor podem chegar até 30 MPa. A Figura 2.14(b) mostra a distribuição de valores da razão entre a permeabilidade após o mesmo esforço inercial ($N=30000$ rpm) e a permeabilidade sem esforço. Os valores de permeabilidade chegam a ser praticamente reduzidos pela metade em algumas regiões, e em outras aumenta em 60%. A Figura 2.14(c) mostra a distribuição da razão entre a permeabilidade após o mesmo esforço inicial de -30 MPa na direção z (simulando por exemplo em esforço gerado durante o empilhamento de lâminas) e a permeabilidade sem aplicação de tensões. Neste caso os valores de permeabilidade aumentaram de 68% a 82%.

Figura 2.14: Tensão inercial radial [Pa] para uma rotação de 30000 rpm b) Razão μ_σ/μ_{ref} para tensão inercial (rotação de 30000 rpm) e c) Razão μ_σ/μ_{ref} para tensão inicial $\sigma_{zz} = -30$ MPa.

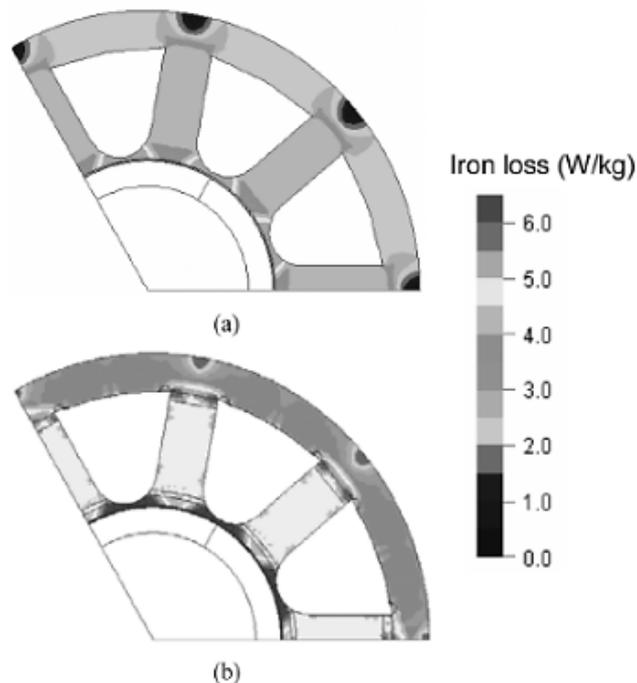


Fonte: (BERNARD et al., 2011)

Nas referências (BERNARD; DANIEL, 2015; MIYAGI et al., 2009) foram realizados estudos sobre a influência do *shrink fitting* utilizando cálculo por elementos finitos. O *shrink fitting* é um processo comum de montagem de motores em que um componente é aquecido ou resfriado antes da montagem, permitindo assim, que os fenômenos de expansão e

contração realizem a junção das peças ao voltarem à temperatura ambiente. Nos motores, pode-se utilizar este processo, por exemplo, para aquecer o eixo do rotor a fim de colocá-lo no núcleo do rotor ou resfriar o estator para facilitar sua colocação na carcaça. Após a junção das peças, esforços de tração e compressão irão surgir. Em (MIYAGI et al., 2009) foi constatado que as perdas no ferro no motor aumentaram em 28% devido ao *shrink fitting*. Na Figura 2.15 são apresentadas as distribuições das perdas magnéticas para um motor síncrono de ímãs permanentes em (a) sem considerar o efeito *shrink fitting* e em (b) considerando o efeito. Nota-se que a distribuição e valores de perdas são alterados de uma situação para outra.

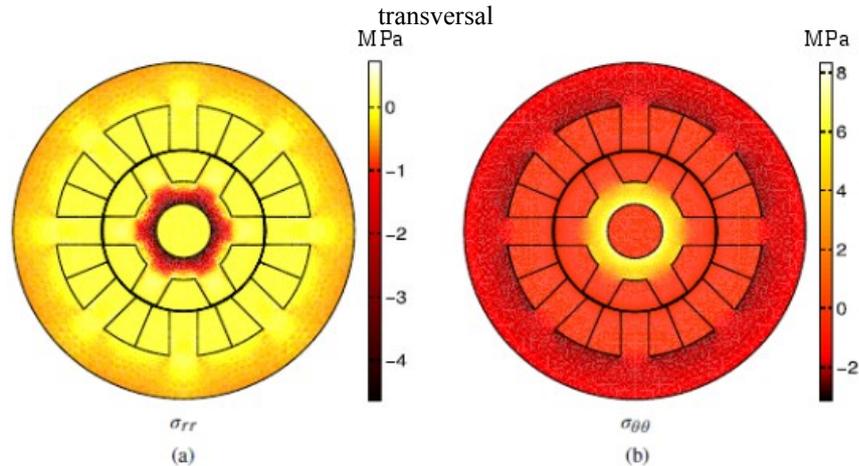
Figura 2.15: Distribuição das perdas no ferro (a) sem considerar o efeito *shrink fitting* e (b) considerando esse efeito.



Fonte: (MIYAGI et al., 2009)

Na Figura 2.16 são apresentados os valores de tensão radial σ_{rr} e transversal $\sigma_{\theta\theta}$ de uma simulação realizada por (BERNARD; DANIEL, 2015) levando em conta efeitos de montagem do motor através de um deslocamento de $0,5 \mu\text{m}$ no raio interno do rotor e de $0,5 \mu\text{m}$ no raio externo do estator. Nesta figura, observa-se uma compressão radial de até 4 MPa no rotor. Na direção tangencial, tem-se uma tração que chega até 8 MPa no rotor e uma compressão de até 2 MPa no restante da estrutura.

Figura 2.16: Efeito do *shrink fitting* em um motor de relutância. a) Tensão radial σ_{rr} e b) tensão transversal



Fonte: (BERNARD; DANIEL, 2015)

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.

Os estudos apresentados neste capítulo sobre efeitos magnetostritivos em núcleos de equipamentos elétricos mostram que há uma variação significativa das propriedades dos materiais, tais como permeabilidade e perdas magnéticas. Conhecer o comportamento do material sob tensões mecânicas e excitado magneticamente é importante, pois pode ajudar o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, menos ruidosos e com vibrações mecânicas reduzidas. Neste capítulo, também foram abordados conceitos sobre a magnetostricção, efeitos e relações entre esforço mecânico e campo magnético. No próximo capítulo, conceitos sobre processos de separação de perdas magnéticas e a relação entre perda magnética e tensões mecânicas será abordada.

3. PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS

Como mencionado no capítulo 2, os materiais ferromagnéticos são amplamente utilizados em dispositivos eletromagnéticos. Nesses materiais, a variação de magnetização no material ferromagnético gerada por um campo de excitação provoca o movimento das paredes de domínio e correntes induzidas, gerando as chamadas perdas magnéticas. Uma das mais importantes maneiras de se comparar os materiais ferromagnéticos moles e a eficiência energética de dispositivos eletromagnéticos é baseada na análise das perdas (ELIAS, 2014; FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006; GRAHAM, 1982; KRINGS; SOULARD, 2010). Conhecimento dos valores das perdas magnéticas do material, ou ser capaz de predizê-las no projeto de dispositivos eletromagnéticos, possibilita análises coerentes e, em último estágio, o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes.

A energia dissipada no material ferromagnético W (3.1) pode ser calculada através da área delimitada pelo seu laço de histerese (ou laço BH quando a frequência for relativamente significativa para ocorrerem perdas magnéticas dinâmicas, que serão vistas mais adiante) (FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006).

$$W = \oint HdB = \oint BdH \quad (3.1)$$

Estudos mostram que as perdas magnéticas podem ser segregadas. Esta segregação das perdas é uma aproximação empírica e tenta separar diferentes tipos de influências físicas devido a variações de frequências e/ou densidade de fluxo magnético. Modelos estatísticos de análises do processo de magnetização determinam três quantidades distintas de perdas magnéticas e como elas afetam as perdas totais de maneira independente (BERTOTTI, 1998a; FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006; KRINGS; SOULARD, 2010). Análises pioneiras sobre este aspecto foram realizadas por Steinmetz (STEINMETZ, 1892a). Ele separou as perdas magnéticas em duas parcelas de perdas energéticas: as perdas por histerese W_h e as perdas por correntes induzidas $W_{cláss}$ (também chamadas de perdas de Foucault ou perdas clássicas). Em (STEINMETZ, 1892b), foi apresentado o modelo (3.2) que representa o comportamento das perdas no ferro W_{fe} , dependentes da indução de pico B_p , e de coeficientes K_h , $K_{cláss}$, onde K_h foi determinado através do ajuste de curvas experimentais e $K_{cláss}$ calculado com dados das lâminas de aço elétrico. A primeira parcela de (3.2) equivale às perdas por histerese e a segunda às perdas clássicas.

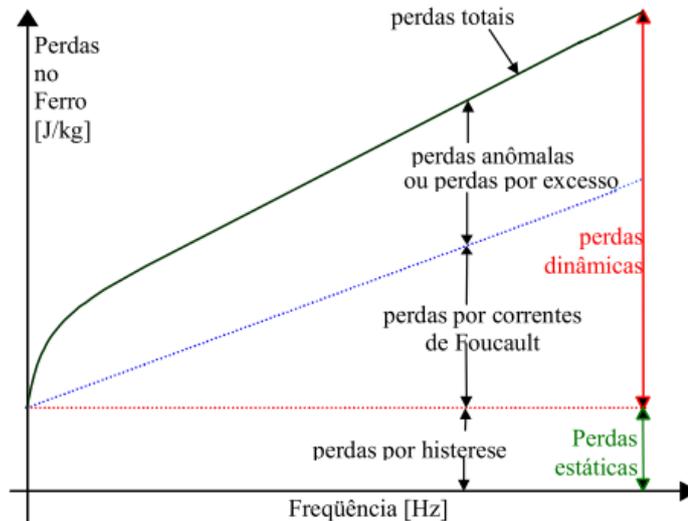
$$W_{fe} = K_h B_p^{1,6} + K_{cláss} f_0 B_p^2 \quad (3.2)$$

Estudos posteriores realizados, sobretudo, por Bertotti (BERTOTTI, 1985a, 1998b), demonstraram a existência de outra parcela de perdas que foi acrescentada ao modelo de Steinmetz: as perdas excedentes. Assim, as perdas dinâmicas, aquelas dependentes da frequência, passaram a ser compostas por duas parcelas: as perdas clássicas e perdas excedentes W_{exc} . Em (3.3), tem-se a separação de perdas nas três parcelas mencionadas.

$$W_{tot} = W_h + W_{cláss} + W_{exc} \quad (3.3)$$

Na Figura 3.1 é apresentada uma representação de cada uma das perdas em função da frequência mantendo uma mesma indução imposta. O comportamento das perdas por histerese é mostrado através de uma reta (pois não variam com a frequência). Nesta figura, são apresentadas também as curvas típicas das perdas clássicas por correntes induzidas (perdas por correntes de Foucault) e das perdas excedentes (perdas anômalas ou perdas por excesso) em função da frequência. Os valores das perdas excedentes são resultados das diferenças entre os valores de perdas totais W_{tot} e a soma dos valores de perdas por histerese e de perdas clássicas. Tem-se, em destaque nesta figura (setas nas cores verde e vermelha), que as perdas por histerese equivalem a parte estática das perdas totais e as perdas por excesso e por correntes de Foucault equivalem às perdas dinâmicas do material.

Figura 3.1: Comportamento das perdas magnéticas.



Fonte: (BATISTELA, 2001).

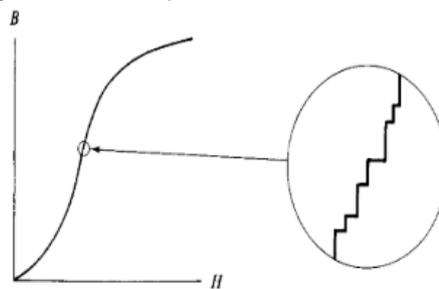
Ao longo do tempo, modificações foram sendo propostas aos modelos de Steinmetz e Bertotti com o fim de aperfeiçoá-los. A seguir são detalhados os conceitos e alguns modelos empíricos propostos que descrevem as perdas de histerese, dinâmicas e excedentes de maneira complementar.

3.1. PERDAS POR HISTERESE

As perdas por histerese são perdas estáticas, pois independem da frequência (STEINMETZ, 1892b). Experimentalmente, as perdas histeréticas são consideradas pelos valores das perdas magnéticas obtidas em um regime quase estático (em uma frequência em que as perdas dinâmicas possam ser desprezadas).

As perdas por histerese são geradas pelo movimento das paredes dos domínios magnéticos (GRAHAM, 1982). Outra visão acrescenta que as perdas por histerese são originadas pela característica descontínua do processo de magnetização em uma estrutura de escala microscópica (BERTOTTI, 1988). As perdas estáticas levam em conta o efeito de “saltos” irreversíveis das paredes de domínio durante o processo de magnetização. Os “saltos” são realizados por pequenos segmentos de paredes de domínio (MAZZETTI, 1978). As paredes “saltam” em função da alteração do campo magnético H . Este fenômeno, chamado de efeito Barkhausen, foi descoberto em 1919 e pode gerar um efeito sonoro que leva o mesmo nome: ruído Barkhausen (CULLITY; GRAHAM, 2009). Na Figura 3.2 é apresentada uma curva de magnetização. Tem-se em destaque nesta figura uma representação do fenômeno Barkhausen. Observa-se que os aumentos da magnetização ocorrem de maneira semelhante à forma de uma escada, onde cada degrau representa aumentos no campo magnético e na indução.

Figura 3.2: Ilustração do efeito Barkhausen.



Fonte: (CULLITY; GRAHAM, 2009)

O modelo derivado de Steinmetz, que descreve as perdas por histerese P_h em W/kg, é dado por (3.4) no qual f_0 representa a frequência na qual o ensaio foi realizado e α é uma constante. Os valores típicos de α variam entre 1,4 e 1,8 quando é caracterizada uma lâmina de aço para fins elétricos. Em alguns casos, o ajuste de curva deste modelo não se mostra satisfatório (BATISTELA, 2001), em específico para valores elevados de indução magnética, mesmo que para formas de ondas senoidais (que é o caso analisado nesta dissertação).

$$P_h = K_h f_0 B_p^\alpha \quad (3.4)$$

Além do modelo de histerese clássico, diversos autores ao longo do tempo vêm estudando outras maneiras de descrever as perdas por histerese. A seguir, são apresentados alguns destes modelos.

Uma modificação realizada no modelo de perdas por histerese de Steinmetz é usada em um software comercial de projeto de motores (MILLER, T. J. E.; MCGILP, 2004), no qual o expoente α de (3.4) é substituído por um polinômio de primeira ordem dependente da indução magnética, conforme apresentado em (3.5).

$$P_h = K_h f_0 B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p} \quad (3.5)$$

De maneira semelhante, no trabalho de (CHEN; PILLAY, 2002) foi introduzida uma formulação (3.6) em que as perdas por histerese são descritas a partir de quatro parâmetros: K_h , α_0 , α_1 e α_2 . No qual α de (3.4) foi substituído por um polinômio de segunda ordem dependente de B .

$$P_h = K_h f_0 B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2} \quad (3.6)$$

Outra variação similar ao modelo proposto por Steinmetz foi proposta no trabalho de (IONEL et al., 2006), no qual α de (3.4) passa a ser um polinômio de terceira ordem dependente da indução magnética conforme dado em (3.7).

$$P_h = K_h f_0 B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2 + \alpha_3 B_p^3} \quad (3.7)$$

Outro método conhecido é o método de Richter (3.8) (BATISTELA, 2001), o qual é um modelo polinomial de segunda ordem sem o termo independente. Devido ao termo quadrático, ocorre um aumento notável de perdas para valores elevados de indução, podendo representar de maneira mais precisa os valores experimentais de perdas nesta faixa de indução magnética. Neste modelo, x_1 e x_2 são constantes.

$$P_h = x_1 f_0 B_p + x_2 f_0 B_p^2 \quad (3.8)$$

Por último, é apresentado em (3.9) um método polinomial de sexta ordem proposto por (MAILHÉ, 2018). Utilizando este método, foi constatado que em determinados casos há um considerável aprimoramento na representação dos valores de perdas em induções magnéticas relativamente baixas (menores do que 0,2 T), quando comparados com o modelo tradicional de Steinmetz (3.4) (MAILHÉ, 2018).

$$P_h = x_0 f_0 + x_1 f_0 B_p + x_2 f_0 B_p^2 + x_3 f_0 B_p^3 + x_4 f_0 B_p^4 + x_5 f_0 B_p^5 + x_6 f_0 B_p^6 \quad (3.9)$$

As proposições de tantos modelos mostram que há preocupação e interesse no desenvolvimento de metodologias para representar as perdas por histerese, mesmo que sejam

com modelos simples. Sabe-se também que quando se impõem esforços mecânicos a um material ferromagnético, em geral, há grande contribuição da parcela proveniente das perdas histeréticas. Neste contexto, encontra-se motivação para realizar pesquisas embasadas nas contribuições desenvolvidas pelas referências na investigação do comportamento dos parâmetros dos modelos das perdas por histerese sob esforço mecânico.

A próxima seção tratará da representação das perdas dinâmicas de materiais ferromagnéticos.

3.2. PERDAS DINÂMICAS

As perdas dinâmicas são assim denominadas por serem dependentes da taxa com que a magnetização varia, ou seja, por serem dependentes da frequência. Neste trabalho, considera-se que a parcela de perdas dinâmicas é formada pela soma das parcelas de perdas clássicas e de perdas excedentes. O modelo de perdas dinâmicas é definido por (3.10), onde K_{din} e θ são constantes.

$$W_{din} = K_{din} B_p^\theta \quad (3.10)$$

3.2.1. Perdas clássicas

Assim como as perdas por histerese, as perdas clássicas são originadas devido a uma variação na magnetização (GRAHAM, 1982; KRINGS; SOULARD, 2010), ou de outra maneira, da variação da indução no material. Mas, diferente das perdas estáticas, as perdas dinâmicas estão associadas com a escala macroscópica da variação na magnetização (BERTOTTI, 1984, 1988; BERTOTTI; FIORILLO; MAZZETTI, 1992), e são possíveis de ocorrerem devido à condutividade elétrica do material. A fim de reduzir a parcela das perdas clássicas, o material utilizado na construção de equipamentos elétricos é laminado para atenuar a circulação de correntes induzidas nos núcleos magnéticos (BASTOS, 2012).

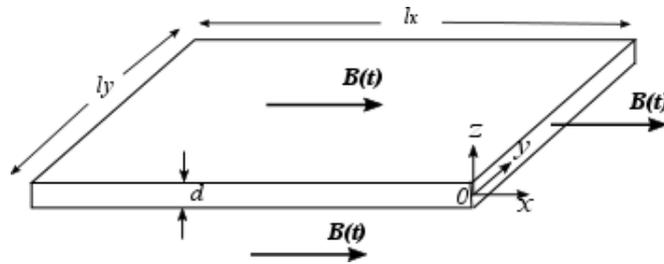
As perdas clássicas, que surgem em uma lâmina de seção retangular submetida a uma indução magnética $\mathbf{B}(t)$, são dadas por (3.11). Nesta equação, V é o volume da amostra e σ_e é a condutividade do material.

$$P_{cláss} = \frac{1}{12} \sigma_e V d^2 \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)^2 \quad (3.11)$$

Uma lâmina com dimensões apresentadas na Figura 3.3 e exposta a uma indução magnética variável no tempo, de sentido indicado nesta figura, tem perdas clássicas por ciclo em [W/kg] calculadas por (3.12), onde m_v é a massa específica do material e T é o período de

$B(t)$. As deduções detalhadas das formulações de perdas clássicas por correntes induzidas, aqui apresentadas, podem ser encontradas em (BASTOS, 2012).

Figura 3.3: Chapa fina de material condutor sendo percorrido por um fluxo magnético B na direção x .



Fonte: (BASTOS, 2012)

$$P_{cláss} = \frac{\sigma_e d^2}{12 m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 dt \quad (3.12)$$

Para uma forma de onda de indução magnética senoidal e unidirecional, os valores de perda em [W/kg] e de energia em [J/kg] por correntes induzidas, são dados por (3.13) e (3.14), respectivamente.

$$P_{cláss} = \frac{\sigma_e d^2}{6 m_v} \pi^2 B_p^2 f_0^2 \quad (3.13)$$

$$W_{cláss} = \frac{\sigma_e d^2}{6 m_v} \pi^2 B_p^2 f_0 \quad (3.14)$$

Nas equações (3.13) e (3.14), as perdas por correntes induzidas são dependentes de parâmetros que podem ser considerados constantes, tais como: a espessura d , a massa específica m_v e a condutividade σ_e . Assumindo esses parâmetros constantes (mais o valor π^2), podem-se escrever as perdas por correntes induzidas como apresentado por (3.15) e (3.16).

$$P_{cláss} = K_{cláss} B_p^2 f_0^2 \quad (3.15)$$

$$W_{cláss} = K_{cláss} B_p^2 f_0 \quad (3.16)$$

A última parcela do modelo de perdas a ser abordada se refere às perdas excedentes, tratada na seção seguinte.

3.2.2. Perdas excedentes

Antigamente, apenas as perdas clássicas eram tidas como dinâmicas. Porém, alguns experimentos mostraram que havia uma perda adicional, não compreendida e modelada, chamada de perda anômala. Diversos estudos foram e são realizados até hoje tentando descrever este tipo de perdas. Segundo Mazetti (MAZZETTI, 1978), essas perdas estão

relacionadas com o movimento descontínuo e aleatório das paredes de domínio magnético, que além de gerarem as perdas por histerese, são também responsáveis pelas perdas anômalas em materiais laminados. Bishop (BISHOP, 1985) atribui tais perdas a uma contínua reorganização das configurações de domínio. Esta sucessão de fenômenos gera micros correntes que serão induzidas pelo deslocamento de paredes de domínio e, conseqüentemente, as perdas magnéticas. O termo excedente surgiu dos estudos de Bertotti (BERTOTTI, 1985a), que também propôs um modelo para este tipo de perda. Apesar de chamada por alguns autores de perdas anômalas durante certo tempo, hoje se sabe que não são “anômalas”, e sim surgem devido à existência das estruturas de domínios e das interações entre as paredes de domínios. Bertotti (BERTOTTI, 1998b) acrescenta que as perdas excedentes advêm das correntes induzidas que ocorrem em torno das paredes de domínio, ou partes de paredes, em movimento sob a influência da variação do campo magnético externo.

Em (BERTOTTI, 1985a) é apresentada a formulação (3.17) para se calcular as perdas excedentes que leva em conta, dentre outros fatores, o número de objetos magnéticos ativos no estado quase estático n_0 e o campo magnético característico que rege o aumento de objetos magnéticos devido ao campo externo aplicado V_0 . Em (3.17) ρ é a densidade do material, σ_e é a sua condutividade elétrica, G é uma constante e S é a seção transversal (maiores detalhes pode ser encontrados em (BERTOTTI, 1985a)).

$$P_{exc} = \frac{1}{\rho} 2B_p f \left(\sqrt{n_0^2 V_0^2 + 2\pi^2 \sigma_e G S V_0 B_p f} - n_0 V_0 \right) \quad (3.17)$$

Bertotti também propôs em (BERTOTTI, 1988), para um regime de indução na forma senoidal, que as perdas excedentes são modeladas por (3.18) em função da indução magnética elevada ao expoente 1,5, da frequência de ensaio elevada a frequência 0,5 e de uma constante K_{exc} .

$$W_{exc} = K_{exc} B_p^{1,5} f_0^{0,5} \quad (3.18)$$

Neste trabalho, considera-se que as perdas totais nas chapas ensaiadas são compostas pelas três parcelas atualmente conhecidas: perdas por histerese, perdas clássicas e perdas excedentes (3.19) e que possa ser descrita através de um modelo de potência, onde K_{tot} e γ são constantes. As perdas excedentes serão obtidas, empregando o modelo das perdas dado por (3.18), a representação das perdas por histerese será dada por diferentes modelos ((3.4) a (3.9)) e o modelo de representação de perdas clássicas é dado por (3.16).

$$W_{tot} = K_{tot} B_p^\gamma = W_h + K_{cláss} B_p^2 f_0 + K_{exc} B_p^{1,5} f_0^{0,5} \quad (3.19)$$

3.3. INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS MECÂNICOS NOS MODELOS DE PERDAS MAGNÉTICAS

Conforme apresentado na seção 2.2, os efeitos dos esforços mecânicos que ocorrem nas máquinas elétricas modificam de maneira considerável suas perdas magnéticas. É de se esperar que, se o comportamento das perdas magnéticas se modifica, o mesmo ocorre com as curvas de perdas que representam este material e, assim, o parâmetro de perdas que antes representava satisfatoriamente esta curva, não mais o faz.

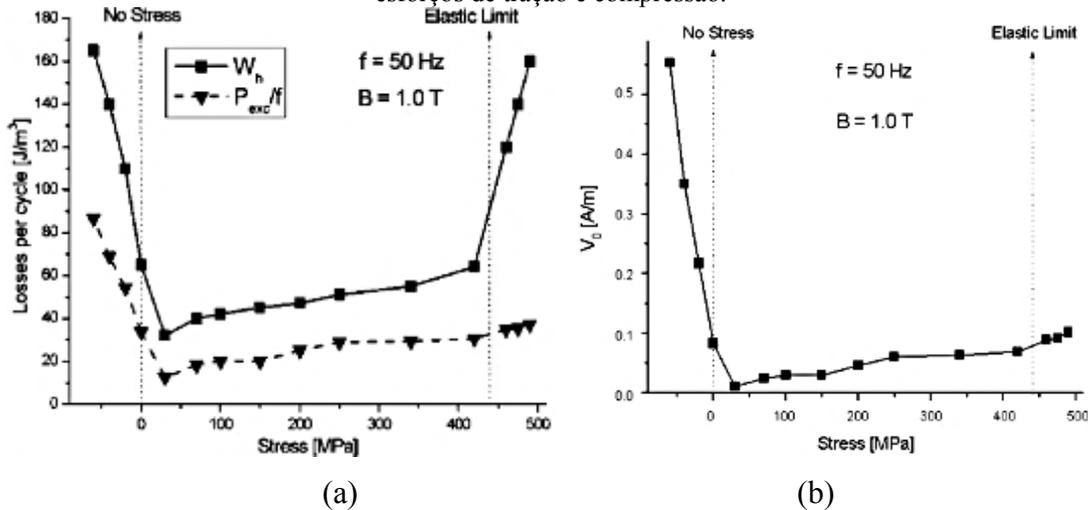
Diversos estudos⁶ vêm sendo realizados a fim de descrever o comportamento dos parâmetros dos modelos que representam as curvas de perdas magnéticas de materiais laminados e/ou dos parâmetros de cálculo de perdas (por exemplo, das perdas excedentes) em função dos esforços mecânicos. Alguns resultados encontrados na literatura serão apresentados como exemplos na próxima seção.

3.3.1. Exemplos de estudos da variação de parâmetros de separação de perdas magnéticas

Bertotti afirmou (BERTOTTI, 1985b) que o parâmetro V_0 da formulação (3.17) é proporcional à parcela de campo magnético de histerese H_h quando aplicados esforços mecânicos de tração (nesta abordagem, considera-se que o campo magnético externo que induz uma indução magnética uniforme pode ser separado entre parcelas referentes às perdas por histerese H_h , às perdas por correntes induzidas $H_{cláss}$ e às perdas excedentes H_{exc}). Como V_0 é proporcional a H_h , a variação dos valores de V_0 , quando aplicados esforços mecânicos, se comporta de maneira semelhante à variação das perdas por histerese. Na Figura 3.4(a), da referência (PERMIAKOV et al., 2004), está rerepresentado o comportamento obtido das perdas por histerese e perdas excedentes do material quando aplicados esforços de tração, excedendo o limite elástico do material ensaiado. As duas curvas indicam certa semelhança entre as perdas por histerese e as perdas excedentes, fato que corrobora a conclusão de Bertotti. Na Figura 3.4(b), tem-se a variação de V_0 quando aplicados os mesmos esforços de tração e compressão no material. Comparando-se as tendências das curvas das duas figuras, percebe-se que a evolução dos valores de V_0 em função dos esforços mecânicos possui comportamento semelhante ao das perdas por histerese até o limite elástico do material.

⁶ (BERTOTTI, 1985b; KARTHAUS et al., 2017; KARTHAUS; STEENTJES; HAMEYER, 2016; LEUNING et al., 2016; PERMIAKOV et al., 2003, 2004; SAEED, 2015; SINGH et al., 2015).

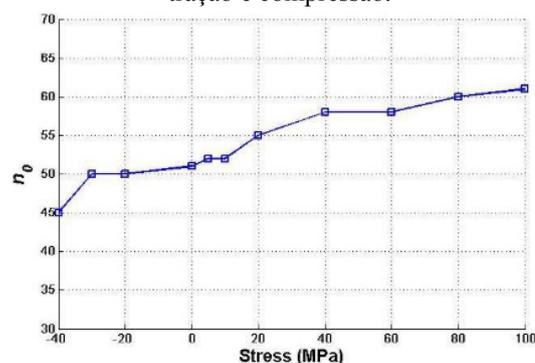
Figura 3.4: Variação (a) das perdas por histerese e perdas excedentes e (b) parâmetro V_0 quando impostos esforços de tração e compressão.



Fonte: (PERMIAKOV et al., 2004)

Em (SINGH et al., 2015), a influência da tensão mecânica no valor do parâmetro n_0 no modelo das perdas excedentes (3.17) foi analisada quando aplicados níveis de esforços entre 40 MPa de compressão e 100 MPa de tração. Na Figura 3.5 é apresentada a variação deste parâmetro quando aplicados níveis de esforços mecânicos de tração e de compressão. Nesta figura, observa-se que os valores deste parâmetro aumentam com a alteração do esforço de compressão para o de tração.

Figura 3.5: Variação do parâmetro n_0 das perdas excedentes quando aplicados esforços de diferentes níveis em tração e compressão.



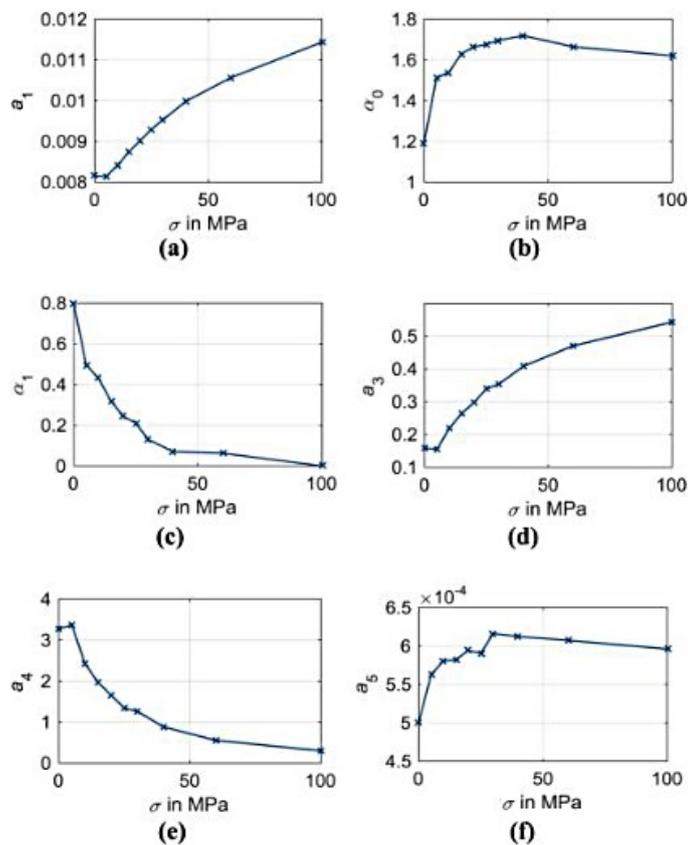
Fonte: (SINGH et al., 2015)

Em (KARTHAUS et al., 2017), foi analisada a variação dos parâmetros de perdas por histerese a_1 , α_0 e α_1 ($P_h = a_1 B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p} f$), de perdas por correntes induzidas a_2 , a_3 , α_4 ($P_{cláss} = a_2 B_p^2 f^2 + a_3 a_4 B_p^{(2+\alpha_4)} f^2$)⁷ e de perdas excedentes a_5 ($P_{exc} = a_5 B_p^{1,5} f^{1,5}$)

⁷ Nesta representação, é adicionado um termo ao modelo tradicional de perdas clássicas que leva em conta a não linearidade no comportamento dessas perdas principalmente em elevados valores de densidade de fluxo magnético (KARTHAUS et al., 2017).

quando aplicados diferentes níveis de esforços mecânicos de tração. Na Figura 3.6 são apresentados os resultados obtidos, mostrando a variação dos parâmetros do modelo de perdas por histerese: (a) a_1 , (b) α_0 , (c) α_1 ; de perdas clássicas: (d) a_3 , (e) α_4 , e de perdas excedentes: (f) a_5 . O coeficiente a_2 do modelo de perdas clássicas pode ser calculado a partir de parâmetros construtivos da amostra e, nesta referência, foi considerado constante para todos os níveis de carregamentos aplicados. Nesta figura, observa-se que há uma significativa alteração em todos os parâmetros de perdas determinados nesta referência.

Figura 3.6: Variação dos coeficientes de perdas por histerese (a) a_1 , (b) α_0 , (c) α_1 ; de perdas clássicas (d) a_3 , (e) α_4 , e de perdas excedentes (f) a_5 quando aplicados esforços mecânicos de tração.

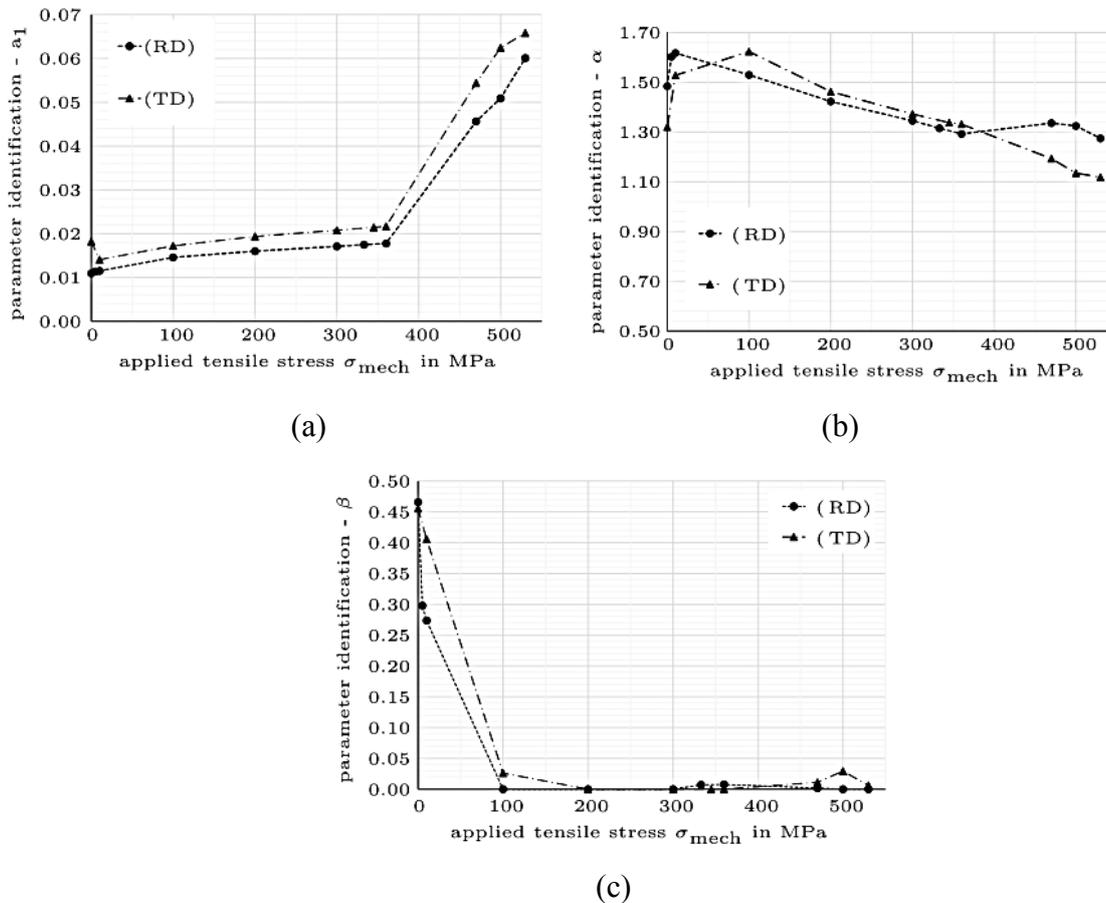


Fonte: (KARTHAUS et al., 2017).

Na referência (LEUNING et al., 2016), foram analisados os comportamentos dos parâmetros do modelo das perdas por histerese em amostras com direções de corte longitudinal e transversal para deformações elásticas e plásticas, submetidas a esforços de tração de 0 MPa a 530 MPa. Neste artigo, realizou-se a separação de perdas nas três componentes: perdas por histerese ($P_h = a_1 B_p^{\alpha + \beta B_p} f$), perdas clássicas e perdas excedentes. Na Figura 3.7(a), tem-se as curvas do coeficiente a_1 para as duas direções de corte. Este coeficiente apresenta uma grande variação nos seus valores determinados, principalmente

quando há uma maior intensidade de esforço mecânico, maiores que 400 MPa. Entretanto, em 400 MPa o material passou a sofrer efeito plástico. Na Figura 3.7(b) são apresentadas as variações do parâmetro α em função dos carregamentos impostos. A Figura 3.7(c) apresenta as variações dos valores do parâmetro β em função dos esforços mecânicos. Observa-se nesta figura uma diminuição acentuada dos valores de β até 100 MPa quando comparados com o caso sem esforços mecânicos, e após 100 MPa, β é praticamente nulo.

Figura 3.7: Variação dos parâmetros das perdas por histerese para esforços entre 0 MPa e 530 MPa. Onde (a) refere-se aos parâmetros a_1 , (b) a α e (c) a β .

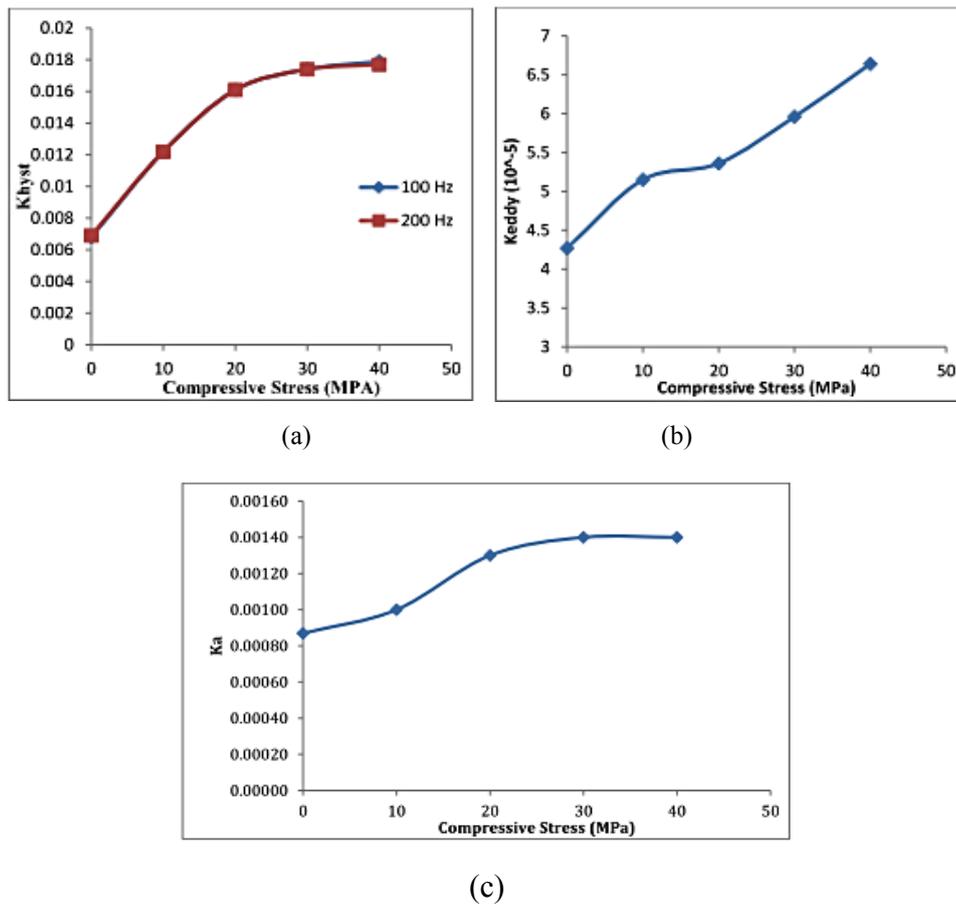


Fonte: (LEUNING et al., 2016)

Na dissertação de mestrado de (SAEED, 2015), foram analisados os efeitos de esforços de compressão até 40 MPa nos valores dos parâmetros de perdas por histerese, perdas clássicas e perdas excedentes, representadas na nomenclatura do autor por K_{hyst} , K_{eddy} e K_a , respectivamente. As perdas totais, neste estudo, foram tratadas em [W] e representadas pela fórmula: $P_{tot} = K_{hyst} B_p^\alpha f + K_{eddy} B_p^2 f^2 + K_a B_p^{1,5} f^{1,5}$. Na Figura 3.8(a) são apresentados valores de K_{hyst} nas frequências de 100 Hz e 200 Hz, em 1 T. A variação deste coeficiente apresentou um elevado aumento até 20 MPa de compressão e um aumento menos

significativo entre 20 MPa e 40 MPa. Na Figura 3.8(b) são apresentados valores de K_{eddy} na frequência de 100 Hz, em 1 T. Este coeficiente também sofreu um aumento conforme se intensificaram os esforços compressivos, variando de cerca de $4,3 \times 10^{-5}$ até cerca de $6,5 \times 10^{-5}$ (cerca de 33% de variação). A Figura 3.8(c) apresenta a variação dos valores do coeficiente de perdas excedentes K_a . O comportamento deste coeficiente em compressão se assemelhou ao do coeficiente das perdas por histerese.

Figura 3.8: Variação dos parâmetros dos modelos de perdas em função dos esforços de compressão aplicados nas frequências de (a) 100 Hz, 200 Hz e 1 T para K_{hyst} (b) 100 Hz e 1 T para K_{eddy} e (c) 100 Hz e 1 T para K_a .

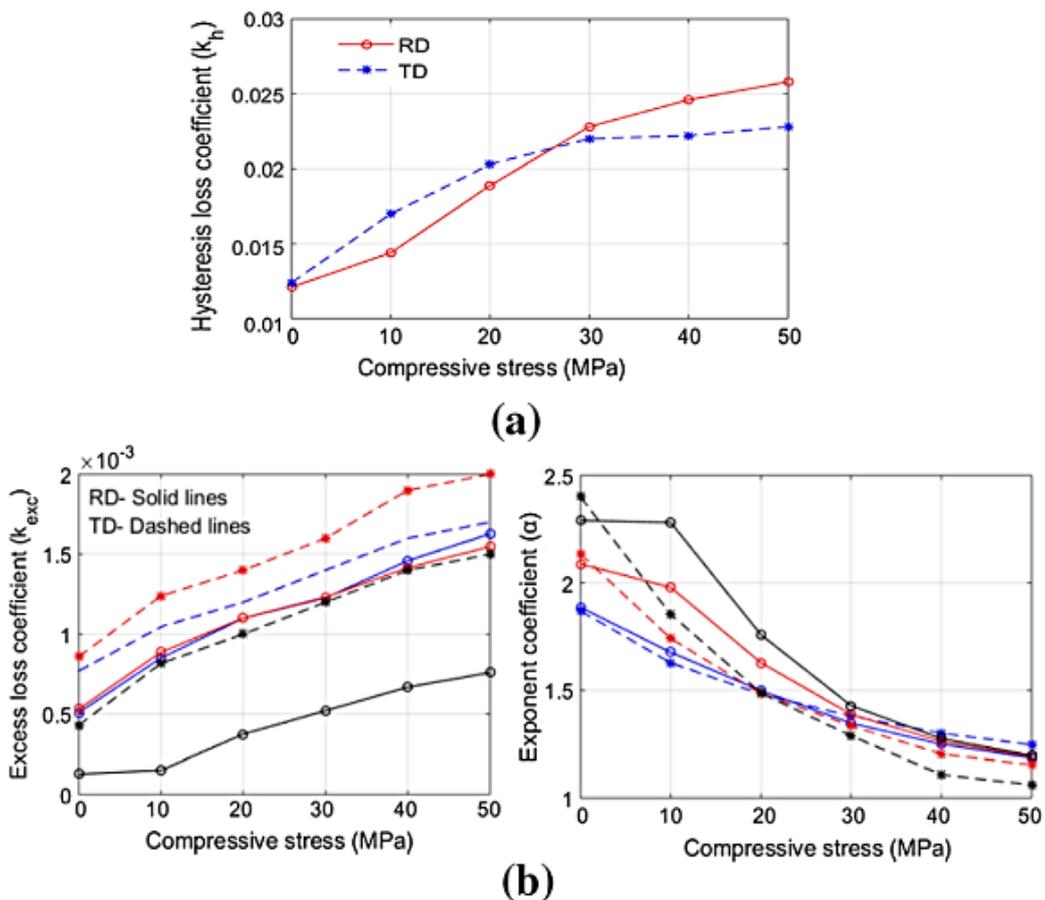


Fonte: (SAEED, 2015).

Na referência (BAGHEL et al., 2019), foi realizado um estudo de separação de perdas nas três parcelas conhecidas ($P_{tot} = K_h B_p^{(\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2)} f + K_{cláss} B_p^2 f^2 + K_{exc} B_p^{1,5} f^{1,5}$). Foram avaliados os comportamentos dos valores dos parâmetros K_h (Figura 3.9(a)), K_{exc} (Figura 3.9(b)) e α que equivale ao polinômio $\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2$ (Figura 3.9(c)) em função do nível de compressão aplicado (0 MPa a 50 MPa) para amostras com angulações de 0° (RD) e 90° (TD) entre direção de corte e direção de laminação. Na Figura 3.9 são apresentados os

comportamentos dos três coeficientes de perdas por histerese e perdas excedentes quando aplicados esforços de compressão de até 50 MPa para as amostras RD e TD. Nesta figura, as linhas contínuas referem-se aos resultados da amostras RD e as linhas tracejadas referem-se aos resultados da amostra TD. Ambas as linhas contínuas e tracejadas nas cores vermelha, azul e preta referem-se aos resultados nas induções de 0,5 T, 1 T e 1,5 T, respectivamente. Com relação aos valores do coeficiente de perdas por histerese (Figura 3. 9(a)), os autores constaram que até cerca de 25 MPa de compressão, os valores desse coeficiente na amostra TD foram superiores aos da amostra RD. Após 25 MPa, este comportamento se inverteu. Já com relação aos coeficientes de perdas excedentes nas, observou-se que, independente do nível de indução magnética analisado, os valores da amostra TD foram superiores aos da amostras RD (Figura 3. 9(b)).

Figura 3. 9: Variação dos valores dos coeficientes de perdas (a) K_h , (b) K_{exc} e (c) α em função do nível de compressão para amostras com direções de corte de 0° e 90° (RD e TD, respectivamente) em induções magnéticas 0,5 T, 1,0 T e 1,5 T.



Fonte: (BAGHEL et al., 2019)

Existem diversos estudos recentes que têm investigado o comportamento dos coeficientes dos modelos de perdas. Em geral, nota-se a importância deste tema e a amplitude que este assunto pode proporcionar. No presente trabalho, serão investigados os comportamentos dos coeficientes de perdas magnéticas das perdas por histerese e das perdas dinâmicas (representada pela soma das perdas clássicas e perdas excedentes) quando impostos esforços mecânicos de tração e compressão. Tais aspectos serão analisados para amostras com três direções de corte: 0° , 45° e 90° . No próximo capítulo, são apresentadas as bancadas e as metodologias empregadas para obtenção dos resultados deste trabalho.

4. BANCADAS DE ENSAIOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais utilizados para realização dos ensaios de caracterização magnética de chapas quando submetidas, ou não, a carregamentos mecânicos. Além disso, serão também detalhadas as metodologias de ensaio experimental e da separação de perdas magnéticas empregadas.

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para se obterem os resultados desta dissertação consistem em duas bancadas experimentais: i) uma bancada na qual é possível realizar a imposição de esforços mecânicos e a medição de características magnéticas das amostras⁸; e ii) uma bancada comercial para caracterização magnética, Brockhaus® MPG200, nos quais os resultados sem esforços mecânicos (perdas magnéticas e campo magnético, por exemplo) foram utilizados como referência em comparações. Em ambas as bancadas, foram ensaiadas lâminas de aço silício de GNO, com tratamento térmico. Nas seções a seguir, serão apresentadas em detalhe as duas bancadas e as lâminas empregadas para o desenvolvimento do trabalho.

4.1.1. Lâminas de Fe-Si

As amostras escolhidas para serem ensaiadas e analisadas foram cortadas com direções de corte em relação à direção de laminação de 0°, 45° e 90°. Na bancada magnetomecânica, foram caracterizadas, ao total, seis amostras: duas em cada direção de corte. Na Tabela 4.1 são apresentadas as dimensões das amostras caracterizadas na bancada de esforços mecânicos.

Além da caracterização na bancada de esforços mecânicos, foram realizadas medições na bancada comercial, disponível no laboratório⁹. Na Brockhaus®, foram ensaiadas amostras com direções de corte de 0° e de 90° (por não haver disponibilidade no laboratório, não foram caracterizadas amostras com direções de corte 45° na bancada comercial). Na Tabela 4.2 são apresentadas as características dimensionais das amostras utilizadas no teste de chapa única da Brockhaus®.

⁸ Tal bancada é chamada neste trabalho de bancada de esforços mecânicos ou bancada magnetomecânica.

⁹ GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) da UFSC.

Os dados dimensionais foram obtidos de uma média de no mínimo três medições, sendo que para a espessura o número de medições foi maior.

Tabela 4.1: Dimensões das amostras utilizadas para medições na bancada de esforços mecânicos.

Direção de corte	Numeração	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)
0°	1	300,00	98,43	0,52	122,72
	2	300,00	97,25	0,53	122,07
45°	1	299,50	98,83	0,51	123,00
	2	300,00	97,73	0,51	121,07
90°	1	300,00	98,99	0,52	123,25
	2	300,00	98,25	0,51	122,27

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 4.2: Dimensões das amostras utilizadas para medições na Brockhaus® MPG200.

Direção de corte	Numeração	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Massa (g)
0°	1	280,00	30,97	0,50	34,83
	2	280,00	30,00	0,52	36,00
90°	1	280,00	30,13	0,51	35,03
	2	280,00	31,00	0,54	34,74

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Especificadas as características dimensionais das amostras utilizadas para medições, são apresentadas as duas bancadas de testes utilizadas para efetuar os ensaios de caracterização magnética.

4.1.2. Brockhaus® MPG200

Esta bancada comercial possibilita a realização de ensaios com controle da indução magnética em diferentes formas de ondas, tais como: senoidal, PWM, harmônica, forma livre e DC. Podem-se caracterizar amostras em formato de lâmina utilizando os módulos Epstein ou SST e amostras com diferentes formatos (toróides, por exemplo) através do módulo *Ring Core*. Na Figura 4.1 é apresentada uma foto da bancada comercial disponível no GRUCAD com suas partes e módulos numerados de 1 a 5. Nesta figura, a numeração de 1 a 5 indica o painel frontal da bancada Brockhaus® MPG200, o módulo *Ring Core*, o computador para observação dos resultados durante a execução dos ensaios e exportação de resultados, caso desejado, o quadro de Epstein e o módulo SST, respectivamente.

Figura 4.1: Foto da bancada comercial *Brockhaus*® MPG200 (1.) com os módulos *Ring Core* (2.), Epstein (4.), SST (5.) e computador (3.) em destaque.

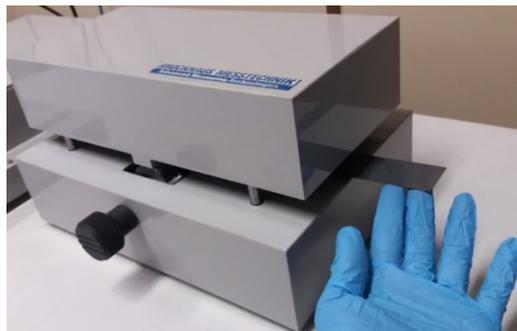


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Neste trabalho, são analisadas características magnéticas de amostras em formato laminado. Para caracterizar esse tipo de amostra, é possível utilizar ambos os módulos Epstein ou SST. Mas, devido à limitação da quantidade de amostras disponíveis, o uso adequado do quadro de Epstein foi impossibilitado. Então, para obtenção dos resultados desta dissertação, foram realizadas medições utilizando-se o módulo SST em duas amostras de cada direção de corte a fim de aumentar a confiabilidade das comparações realizadas.

O aparato de medição de chapa única desta bancada consiste de um núcleo de material ferromagnético envolvido por um enrolamento de excitação com 660 espiras e um enrolamento para medição da indução magnética (tensão induzida nos terminais de um enrolamento aberto) com 700 espiras. Na Figura 4.2 é apresentada uma foto do módulo de teste de chapa única utilizado nas medições de referência das amostras com direções de corte de 0° e 90° . Nesta figura, é indicado o local de inserção da lâmina.

Figura 4.2: Foto do módulo SST da Brockhaus® MPG200.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Para operação desta bancada, utiliza-se um programa específico denominado *MPG Expert*. O processo de utilização deste programa pode ser descrito, de maneira simplificada, em três passos:

- Inserção dos dados referentes às dimensões, à seção transversal e à densidade da amostra;
- Escolha do módulo que será realizado o ensaio;
- Configuração do ensaio.

Na Brockhaus®, foram realizados ensaios em valores de induções magnéticas de 0,1 T a 1,5 T, em passos de 0,1 T, e frequências de 100 Hz, 50 Hz e 3 Hz (menor frequência de operação da bancada). Esta bancada possibilita também a execução automática de uma rotina de desmagnetização, na qual a bancada sobe até uma indução/campo magnético elevado definido pelo usuário e decresce até próximo de zero. O procedimento de desmagnetização foi repetido a cada mudança de frequência de ensaio. Os resultados fornecidos neste programa podem ser exportados para um arquivo Excel (editor de planilhas da Microsoft®), por exemplo. Dentre os resultados fornecidos por esta bancada, pode-se citar: campo magnético na amostra [A/m], fator de forma FF ¹⁰ da indução magnética, indução remanente B_r [T], campo coercitivo H_c [A/m], perdas magnéticas (totais) [W/kg], perdas dinâmicas [W/kg], perdas por histerese [W/kg], e permeabilidade relativa μ_{rel} .

4.1.3. Bancada de esforços mecânicos

A bancada de esforços mecânicos utilizada para realizar os ensaios foi confeccionada no GRUCAD (MAILHÉ, 2018). Para obtenção dos resultados dessa dissertação, foram realizadas algumas modificações na versão original da bancada proposta por Mailhé (MAILHÉ, 2018) e serão apresentadas nesta seção.

A bancada de esforços mecânicos consiste em um SST modificado para aplicar tensões mecânicas paralelas à direção de fluxo magnético. Esta bancada possibilita o estudo das variações do comportamento magnético de um material quando submetido a um campo magnético variável unidirecional e a esforços mecânicos de tração ou compressão uniaxiais.

Para explicar o funcionamento da bancada magnetomecânica, pode-se dividi-la em três blocos: i) o bloco que consiste do SST modificado onde é realizada a aplicação dos esforços mecânicos na amostra, ii) o bloco que consiste do controle da forma de onda da indução

¹⁰ Fator de forma de uma onda é a razão do seu valor eficaz pelo seu valor médio retificado. É utilizado para avaliar o quanto está próxima a forma de onda do sinal analisado de um sinal senoidal. O fator de forma considerado nominal (senoidal) neste caso é de aproximadamente 1,1107.

magnética na chapa, através do controle da tensão do enrolamento secundário do circuito magnético (SST modificado), e iii) o bloco que consiste no sistema de amplificação das tensões dos sensores-H e na aquisição de dados.

Na Figura 4.3 é apresentada uma foto da bancada magnetomecânica. Nesta figura, estão separados e identificados pela numeração i), ii) e iii) os três blocos da bancada. Uma explicação sobre cada bloco da bancada de esforços mecânicos é apresentada a seguir:

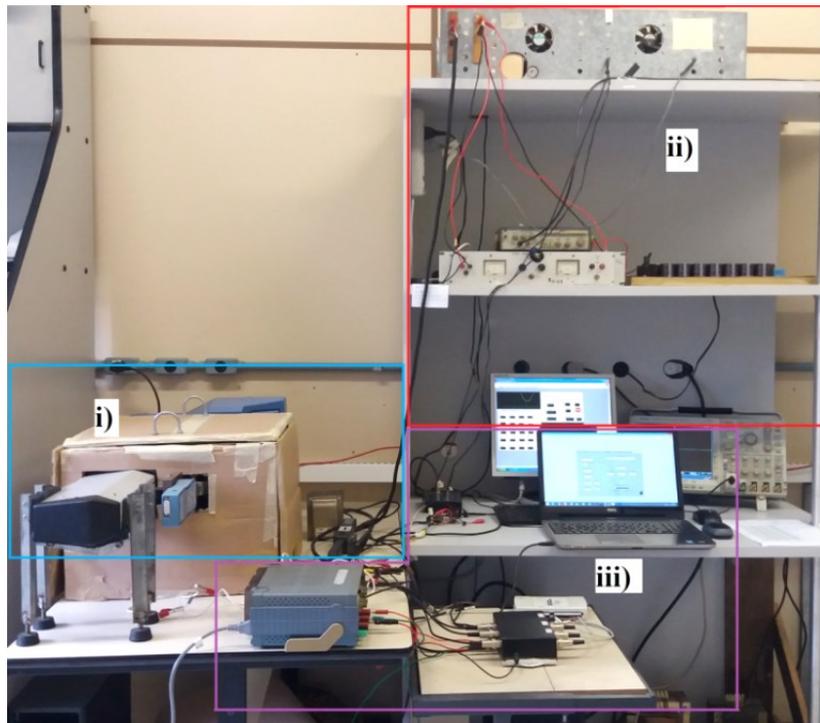
- O primeiro bloco da bancada magnetomecânica está destacado na Figura 4.3 pela numeração i). Este bloco é constituído por um núcleo ferromagnético (duas peças em formato C) com um enrolamento primário de 700 espiras no qual é inserida a lâmina. A lâmina, por sua vez, é colocada dentro de uma estrutura anti-flambagem para suportar carregamentos de compressão sem deformar-se (informações mais detalhadas sobre o projeto da caixa anti-flambagem podem ser encontradas em (MAILHÉ, 2018)). A estrutura anti-flambagem é envolvida por um enrolamento secundário de 375 espiras. A estrutura constituída pelo núcleo ferromagnético, caixa anti-flambagem onde é inserida a lâmina e os enrolamentos primário e secundário são chamados de SST modificado. Nesta figura, o SST modificado está envolvido por uma caixa que tem função de realizar a blindagem eletromagnética externa (vide "i)" da Figura 4.3). O SST modificado está inserido dentro de um equipamento (máquina de tração/compressão universal Mecmesin®) que realiza aplicação de esforços uniaxiais. A força [N] é o parâmetro utilizado para configurar os valores de esforços e é medida através de um dinamômetro com leitura até 2500 N. Na Figura 4.4 é apresentada uma foto do SST modificado.

- O segundo bloco da bancada magnetomecânica está identificado como "ii)" na Figura 4.3 e tem a função de realizar a imposição da excitação e o controle da tensão no enrolamento secundário do SST modificado. Para realizar este controle, é utilizada a bancada previamente construída também no GRUCAD (BATISTELA, 2001). O objetivo do sistema de controle é manter a forma de onda da tensão induzida (que é uma imagem da forma de onda da derivada da indução magnética no material) sempre senoidal (no caso desta aplicação) através de um controle em malha fechada. Para manter a tensão na forma desejada, utiliza-se uma malha de realimentação com controle do tipo não linear por modos deslizantes (*Sliding Mode Control*).

- O terceiro bloco da bancada magnetomecânica, identificado pela numeração "iii)" na Figura 4.3, consiste na amplificação dos sinais de tensões dos sensores utilizados para medir o campo magnético de maneira direta através de sensores bobina-H e na aquisição dos sinais necessários para realização dos cálculos das grandezas de interesse. O campo magnético da

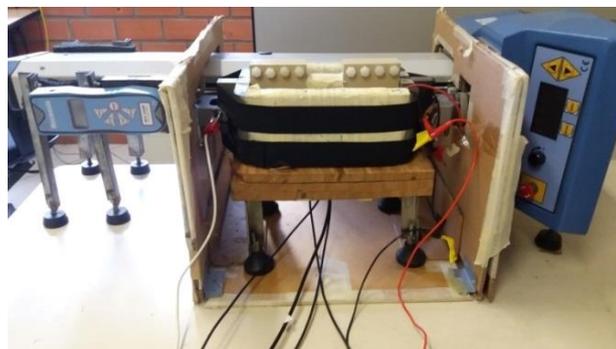
bobina-H mede o campo magnético na superfície da chapa¹¹. Empregam-se três bobinas-H, as quais possuem seções transversais na ordem de $5 \times 10^{-5} \text{m}^2$ a fim de evitar uma sensibilização significativa de campos magnéticos dispersos. Pelo fato da seção transversal da bobina ser relativamente pequena, os valores de tensões induzidas medidos também são reduzidos (da ordem de $0,7 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ a $20 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ em 1 Hz, por exemplo), sendo imprescindível a utilização de uma eletrônica eficiente de filtragem e amplificação de sinais. Neste trabalho, os sinais foram amplificados em 1035 vezes.

Figura 4.3: Foto da bancada magnetomecânica na versão atual utilizada para realizações dos ensaios.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 4.4: Foto de parte da bancada magnetomecânica, na qual é mostrada a configuração do SST modificado sem a blindagem eletromagnética externa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

¹¹ Devido à conservação da componente tangencial do campo magnético (BASTOS, 2012), quando a lâmina é submetida a um campo magnético unidirecional variável, considera-se que o campo magnético na região da bobina posicionada próxima à chapa é sensibilizado pelo campo magnético na própria chapa.

No decorrer do estudo e da utilização da bancada experimental, viu-se a necessidade de serem realizadas algumas modificações na amplificação dos sinais. Foram mantidas as placas com a estrutura de amplificação utilizadas e detalhadas em (MAILHÉ, 2018), porém, adicionou-se um sistema de blindagem a fim de manter tais circuitos na mesma referência das demais conexões da bancada, atenuando interferências. A blindagem construída consiste em um revestimento de alumínio que cobre toda a superfície interna da caixa onde estão os circuitos amplificadores. Além disso, foi melhorado o condicionamento dos cabos que realizam a conexão dos sensores (bobinas-H) ao sistema de amplificação, e deste ponto para o sistema de aquisição de sinais, reduzindo-se também possíveis problemas de conexões que poderiam ocorrer durante a operação da bancada.

Na Figura 4.5 é apresentada a nova disposição do amplificador de sinais construída neste trabalho. Nesta figura, os pontos identificados por 1, 2 e 3 são as saídas referentes às tensões amplificadas (sinais diferenciais que serão lidos pela placa de aquisições de sinais) provenientes das três bobinas-H (o emprego de três sensores de campo magnético será abordado mais adiante). Na parte superior desta foto, estão dispostas as três entradas de tensões conectadas diretamente com os terminais dos sensores (conexão diferencial), bem como as conexões de alimentação do amplificador (cabos em cores vermelha e verde). A conexão existente no lado esquerdo dessa imagem (cabo na cor preta) é a ligação do potencial elétrico de referência da placa de filtragem e amplificação com a referência da bancada de excitação e controle. A blindagem interna da caixa e a carcaça dos cabos dos sensores são conectados a esta referência.

Figura 4.5: Foto da caixa de filtragem e amplificação dos três canais dos sensores de campo.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Outra modificação realizada na configuração da bancada de esforços mecânicos original utilizada em (MAILHÉ, 2018) foi a troca do sistema de aquisição de dados. Foi

utilizada neste trabalho a placa de aquisições NI-6212 da National Instruments® para realizar a comunicação entre o *hardware* e o programa LabVIEW.

Para realizar as análises deste trabalho, foram medidos os seguintes sinais:

- Corrente de excitação do SST modificado;
- Tensão do secundário do SST modificado;
- Tensões induzidas nas três bobinas-H.

Cabe ainda salientar que, apesar de os sensores e suas posições no SST modificado não terem sido alterados, o sistema global, que consiste no conjunto sensores, filtros, amplificadores e placa de aquisição são diferentes do utilizado por (MAILHÉ, 2018). Assim, foi necessário realizar a aferição deste novo conjunto.

A aferição dos sensores foi realizada utilizando um equipamento, chamado bobina de Helmholtz, no qual é possível se obter um campo magnético homogêneo e unidirecional conhecido e localizado no centro da estrutura (os sensores foram inseridos nesta posição). Os valores de campos magnéticos impostos pela bobina de Helmholtz no seu centro foram considerados como referências para os valores das medições de campo através das bobinas-H. Os ensaios de aferição foram realizados em diferentes frequências e em diferentes valores de campos magnéticos. Com os resultados das comparações entre os valores de campo de referência com os de campos medidos pelos três sensores, determinaram-se as constantes de aferição dos sensores (os valores das constantes de aferição são calculados pela divisão entre estes dois valores de referência e medidos pelo sensor). Apesar de os valores das constantes de aferição serem próximas (diferenças menores do que 2% em relação à média) para cada sensor, há um valor de constante de aferição para cada faixa de frequência¹². As constantes de aferição de cada sensor foram inseridas no Instrumento Virtual (Virtual Instruments - VI - programas desenvolvidos em LabVIEW) de tratamento de dados como fatores de correção do campo magnético.

Além da aferição dos sensores bobina-H, foi realizada também a aferição do transdutor de corrente (Tektronix® A622) utilizado nas medições de corrente de excitação. A corrente de referência foi obtida através de outro transdutor (Tektronix® TCP 0030) que possibilita uma aquisição de melhor qualidade (a impossibilidade de se utilizar a ponteira TCP 0030 ocorre, pois, sua saída é compatível apenas com a entrada do osciloscópio).

¹² Frequência de ensaio ≤ 1 Hz, 1 Hz a 5 Hz, 5 Hz a 10 Hz, 10 Hz a 20 Hz, 20 Hz a 50 Hz, 50 Hz a 100 Hz, 100 Hz a 150 Hz e ≥ 300 Hz

Cabe documentar que, para todos os valores aferidos, as constantes de aferição dos sensores de campo magnético, bem como da ponteira de corrente, foram muito próximas de um.

Apresentados os materiais utilizados para realizações dos ensaios de caracterização magnética em chapas de aço elétrico com imposições de carregamentos mecânicos, na próxima seção deste capítulo é discutida a metodologia de ensaios empregada.

4.2. METODOLOGIA DE ENSAIO

Existem algumas metodologias de ensaios que são empregadas quando se investiga a relação entre as características magnéticas e mecânicas, como por exemplo, se são analisados efeitos da magnetostricção ou da magnetostricção inversa. Neste trabalho, investigam-se os efeitos de esforços mecânicos na alteração das características magnéticas (efeitos da magnetostricção inversa) do material. Utiliza-se a metodologia de ensaio σ - H que será discutida nesta seção. A apresentação da metodologia de ensaio empregada será dividida em três partes: a configuração da bancada de esforços mecânicos, a obtenção e o tratamento dos sinais relativos às grandezas magnéticas de interesse.

4.2.1. Configuração da bancada de esforços mecânicos

Na metodologia de ensaio (σ - H) é realizada a aplicação de um valor de esforço mecânico σ na amostra (procedimento descrito na seção 4.2.1.1), de intensidade constante e, após isso, é realizada a imposição de campos magnéticos H (procedimento descrito na seção 4.2.1.2).

Antes do início da execução dos ensaios, são necessários alguns procedimentos de montagem, tais como:

- Medições de dimensões da amostra;
- Inserção da lâmina na estrutura anti-flambagem e no núcleo SST;
- Anexação das blindagens internas e externas;
- Conexões das ligações dos cabos de excitação e do secundário do circuito magnético na bancada de controle;
- Conexões dos sensores bobina-H na placa de amplificação de sinais, alimentada por uma fonte de tensão de 5 V;

- Ligação de todas as referências dos sistemas no mesmo ponto, incluindo uma conexão entre a massa do conjunto SST e o equipamento Mecmesin® com a referência da bancada de excitação;
- Conexões das tensões de saída da placa de amplificação, do sinal de corrente de magnetização e da tensão do enrolamento secundário na placa de aquisição NI-6212;
- Ligação do cabo USB da placa de aquisição a um computador para tratar os sinais medidos através de um VI.

Realizados os procedimentos de montagem e configurações preliminares necessários, passa-se propriamente ao procedimento de ensaio.

4.2.1.1. Configuração do esforço mecânico

A primeira etapa para realização dos ensaios consiste na configuração do tipo e intensidade da tensão mecânica imposto à amostra. A intensidade da força F (lida através de um dinamômetro acoplado ao equipamento de aplicação de esforços) é calculada por (4.1) através do valor do esforço definido a ser imposto σ e da área da seção transversal da lâmina S . Neste trabalho, foram definidas as intensidades de esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa em tração e compressão.

$$F = \sigma \cdot S \quad (4.1)$$

Determinados os tipos (compressão ou tração) e os valores dos carregamentos que se deseja aplicar, pode-se iniciar a configuração do equipamento. Configura-se no painel de controle do equipamento Mecmesin® o modo de controle manual de deslocamento: i) um deslocamento positivo traciona a amostra, e ii) um deslocamento negativo, comprime. Uma vez pressionado o botão que realiza o deslocamento, o usuário pressiona o botão de imposição de deslocamento até que o valor de força indicada no dinamômetro atinja o valor previamente calculado (relativo a um esforço definido). Como a aplicação do esforço neste caso é manual, o deslocamento cessa uma vez que o usuário deixa de pressionar o botão que realiza o deslocamento. Geralmente há uma pequena variação no valor lido no dinamômetro após a retirada da mão do operador. Após o ajuste até o valor correto e estável de força, passa-se para a próxima etapa de magnetização do circuito magnético.

4.2.1.2. Configuração da magnetização

Inicialmente, realiza-se um processo de desmagnetização da amostra para cada conjunto de ensaios. Semelhante ao caso da configuração mecânica, antes de iniciar a realização dos ensaios, deve-se definir a forma de onda da indução magnética que será imposta ao circuito, valores de frequência e os níveis de indução magnética. Neste trabalho, a forma de onda escolhida para indução magnética é de forma senoidal em frequências de 1 Hz, 50 Hz e 100 Hz, nos níveis de indução magnética de pico de 0,05 T a 1,5 T com passo de 0,05 T.

Definidos os requisitos de ensaio, configura-se o sinal de referência da bancada de excitação a fim de atingir os valores de indução magnética na amostra, e, através o computador conectado à placa de aquisição USB, realiza-se a aquisição dos sinais utilizando um VI dedicado a esta função.

O valor da tensão induzida no enrolamento secundário é função da variação temporal da indução na amostra, do número de espiras N_s e da seção transversal da amostra S , como dado pela aplicação da lei de Faraday (4.2). Assim, para uma forma de onda senoidal de frequência f , tem-se a relação entre a indução magnética de pico B_p e o valor eficaz da tensão do secundário V_{RMS} dada por (4.3). Após excitar-se o circuito magnético, deve-se utilizar um osciloscópio para visualizar os valores RMS de tensão do secundário.

$$v(t) = -N_s S \frac{dB}{dt} \quad (4.2)$$

$$V_{RMS} = \sqrt{2} \pi N_s S f B_p \quad (4.3)$$

Atualmente, para começar o processo de excitação, para a bancada que controla o sinal de tensão do secundário do SST modificado se tem a seguinte ordem de atuação:

1. Ligar a fonte das placas de controle da bancada de excitação;
2. Ligar o gerador de sinais da bancada de controle que impõe uma referência ao processo de modulação do inversor interno (onda triangular com frequência de cerca de 40 kHz e tensão de pico a pico de 14 V);
3. Ativar o sinal da referência enviado ao controle (gerado por um VI residente em um computador distinto daquele empregado na aquisição de sinais);
4. Ligar e ajustar o valor da tensão da fonte CC de potência que alimenta bancada de excitação;

Uma vez ligada a bancada de excitação, será injetada uma corrente de excitação de forma livre no circuito SST modificado de maneira a manter a forma de onda da tensão no

enrolamento secundário senoidal (consequentemente, manter a forma da indução magnética na amostra senoidal). Ambos os sinais de tensão e corrente são medidos e verificados simultaneamente utilizando um osciloscópio. Uma vez atingido um valor de indução desejado, passa-se à etapa de aquisição dos sinais de interesse. Este processo é repetido até que sejam adquiridos todos os pontos de operação desejados (ou até onde é possível ensaiar por limitações de tensão ou de corrente da bancada ou da capacidade de manter a forma de onda senoidal no enrolamento secundário).

4.2.2. Aquisição de sinais

A aquisição de sinais é realizada através de uma placa da National Instruments® (NI-6212). A conexão com o computador é realizada via USB. No computador de aquisição, há um instrumento virtual do LabVIEW pelo qual este processo é gerenciado e realizado.

São adquiridos os sinais de tensão, da corrente de excitação do circuito com a ponteira de corrente (escala de transformação 100 mV/A), tensão do secundário (tensão adquirida após um divisor de tensão que pode ser de 2, 5, 10 ou 16) e as três tensões dos sensores (após amplificação de 1035 vezes).

No VI de aquisição, é realizado o cálculo da indução magnética do material, a fim de verificar se realmente foi atingido o valor desejado, primeiramente averiguado pelo valor de tensão do secundário medido pelo osciloscópio. Caso seja necessário algum ajuste de tensão, altera-se a referência a fim de se atingir o valor mais próximo do ponto de operação desejado. E, por fim, o ensaio então é concluído com o armazenamento dos valores das grandezas medidas. Este processo é repetido para todos os pontos de operação a serem investigados.

Após o término dos ensaios, passa-se à etapa de tratamento de dados.

4.2.3. Tratamento de dados

Na etapa de tratamento de dados, são feitos os cálculos para serem realizadas as análises desejadas. Os cálculos realizados no processo de tratamento de dados levam em conta os sinais medidos de corrente de excitação, de tensão do secundário e das tensões dos sensores-H.

A partir da forma de onda da corrente de excitação $i(t)$, do número de espiras do enrolamento primário N_p e do caminho médio magnético l_m do circuito magnético, calcula-se o campo magnético $H_i(t)$ através de (4.4). Quando se obtém o campo magnético através da corrente, diz-se que o H é obtido de maneira indireta.

$$H_i(t) = \frac{N_p}{l_m} i(t) \quad (4.4)$$

Os valores dos campos magnéticos obtidos pelos valores de corrente de excitação não forneceram resultados satisfatórios. Os resultados qualitativamente tiveram formas de onda ruidosas e apresentaram diferenças de valores e formas de onda significativas quando comparadas com o cálculo através das bobinas-H (principalmente em frequências reduzidas). Assim, não se empregou este método indireto de obtenção de campo magnético.

A partir da tensão do secundário $v_s(t)$, calcula-se a indução magnética $B(t)$, como dado em (4.5). Nesta equação, N_s é o número de espiras do enrolamento secundário, S é a seção transversal da amostra e T é o período do sinal de tensão.

$$B(t) = \int_0^t -\frac{1}{N_s S} v_s(u) du \quad (4.5)$$

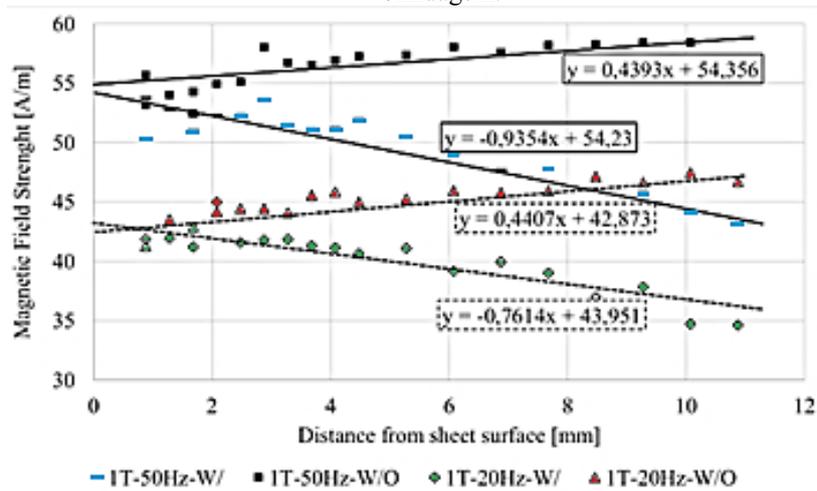
A partir das aquisições das tensões de três sensores localizados em posições diferentes e conhecidas da lâmina, calcula-se o campo magnético instantâneo nos três sensores utilizando (4.6). Nesta equação, N_H é o número de espiras da bobina-H, S_H é a seção transversal da bobina, μ_0 é a permeabilidade do ar e v_H é a tensão adquirida nos terminais da bobina-H. A partir da extrapolação da tendência dos três valores de campos magnéticos instantâneos medidos pelos sensores nas três distâncias conhecidas, obtém-se o valor do campo magnético na superfície da amostra (MAILHÉ, 2018; MAILHÉ et al., 2018). O campo magnético calculado para a superfície da amostra é chamado de campo magnético extrapolado H_{extrap} e é considerado como o valor de campo magnético na superfície da lâmina.

Na Figura 4.6 são apresentadas curvas e um esquema do processo de extrapolação para facilitar a compreensão da metodologia de extrapolação empregada para a obtenção do campo magnético. São apresentados dois tipos de resultados: um empregando blindagem (curvas de extrapolação linear a partir dos dados experimentais onde os losangos na cor verde e os traços na cor azul equivalem aos ensaios em 20 Hz e 50 Hz, respectivamente e 1 T) para atenuar efeitos de campos dispersos que não são relacionados ao campo no interior da amostra, e outro sem o emprego da blindagem (curvas de extrapolação linear a partir dos dados experimentais onde os triângulos na cor vermelha e os quadrados na cor preta equivalem aos ensaios em 20 Hz e 50 Hz, respectivamente e 1 T). Quando não se utiliza a blindagem, o campo medido pelo processo de extrapolação tem uma tendência de aumentar o valor medido ao se distanciar da amostra. Quando se utiliza a blindagem, os valores dos campos medidos diminuem ao aumentar a distância da amostra. Apesar da diferença entre os resultados obtidos com e sem blindagem, os valores das perdas são semelhantes quando próximos da superfície

da lâmina (distância zero). Na referência (MAILHÉ et al., 2018) tem-se mais detalhes sobre a medição de maneira indireta utilizando-se sensores Bobina-H nesta bancada experimental.

$$H_{extrap}(t) = -\frac{1}{N_H S_H \mu_0} \int_0^t v_H(u) du \quad (4.6)$$

Figura 4.6: Extrapolação linear de valores de campos magnéticos experimentais em um sistema com e sem blindagem.



Fonte: Modificado de (MAILHÉ, 2018).

Além dos valores de campo magnético (obtidos através dos métodos direto e indireto) e de indução magnética, calcularam-se também os valores de fator de forma da onda da indução magnética, permeabilidade relativa (4.7), campo magnético coercitivo, indução remanente e perdas magnéticas (totais) medidas em [W/kg] e [J/kg]. Todos os cálculos dependentes do campo magnético, como por exemplo, perdas e permeabilidade, foram realizados utilizando valores H_{extrap} obtidos pelo método direto. Em (4.7), H_p é o valor do campo magnético de pico.

$$\mu_r = \frac{B_p}{H_p \mu_0} \quad (4.7)$$

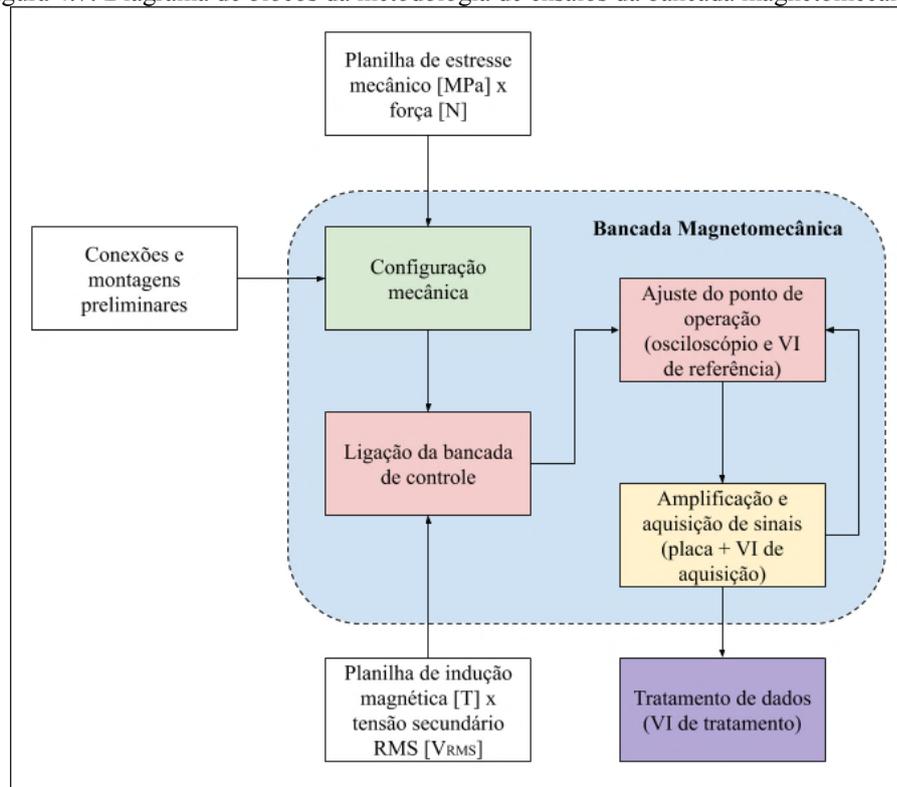
4.2.4. Resumo da metodologia de ensaio da bancada de esforços mecânicos

Sumarizando, a bancada magnetomecânica é constituída por um sistema de medição SST modificado acoplado a um equipamento que possibilita a imposição de carregamentos mecânicos na amostra. Os parâmetros tensão no secundário e corrente de excitação do SST modificado são impostos por uma bancada de controle que possibilita uma indução magnética senoidal na chapa. A Figura 4.7 apresenta o diagrama de blocos com uma explicação

simplificada da bancada magnetomecânica e da metodologia de ensaios empregada e previamente discutida em 4.1 e 4.2.

No diagrama da Figura 4.7, os quadros de cor branca são as atividades que devem ser realizadas anteriormente ao início da realização dos ensaios na bancada magnetomecânica, tais como preenchimento de planilhas em que se calcula a relação entre os esforços mecânicos desejados equivalentes às forças que devem ser lidas no dinamômetro do equipamento mecânico e também os valores de tensão induzida necessários para se atingir os valores das induções magnéticas desejadas. Também, ao iniciar os ensaios, devem-se realizar previamente as conexões e montagens necessárias. O bloco na cor verde no diagrama de blocos é chamado de configuração mecânica e consiste no primeiro passo para realização dos ensaios com metodologia σ - H . Para configurar o esforço mecânico imposto à amostra, deve-se ajustar o parâmetro de deslocamento em [mm] a fim de se atingir a força equivalente ao esforço desejado. Configurada a parte mecânica da bancada através desta metodologia, passa-se à configuração da magnetização da amostra. Para isto, deve-se ligar a bancada de controle. Em cada frequência ensaiada, a amostra deve ser desmagnetizada e os pontos de operação (níveis de indução magnética) desejados são ajustados. Para isto, modifica-se a referência do sinal enviado ao controle a fim de se obter um valor de tensão induzida no secundário (lido no osciloscópio) equivalente à indução magnética desejada. Estes procedimentos correspondem aos blocos na cor rosa da Figura 4.7. O último bloco (cor amarela) do esquema da bancada magnetomecânica é constituída pela parte de filtragem/amplificação e aquisição dos sinais. O processo de ajuste do ponto de operação e a obtenção de sinais são realizados para os vários pontos de operação do ensaio. O tratamento dos dados obtidos dos ensaios (bloco na cor roxa) é realizado através de um VI específico que efetua os cálculos e apresenta as curvas para as análises.

Figura 4.7: Diagrama de blocos da metodologia de ensaios da bancada magnetomecânica.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na próxima seção deste capítulo, é apresentada a metodologia de separação de perdas empregada neste trabalho.

4.3. METODOLOGIA DE SEPARAÇÃO DE PERDAS MAGNÉTICAS

As separações de perdas magnéticas foram realizadas utilizando os modelos apresentados no capítulo 3. Foram calculados os parâmetros de perdas por histerese (para os seis modelos), de perdas clássicas e de perdas excedentes. Além disso, são também calculados os coeficientes para modelar as perdas totais e perdas dinâmicas. Para realizar os cálculos dos parâmetros dos modelos, foi utilizado o editor de planilhas Excel.

Para realização da separação de perdas foram necessárias curvas de perdas experimentais. No caso deste trabalho, foram utilizadas as medições de perdas em 100 Hz para a obtenção das perdas totais e em 1 Hz para as perdas por histerese.

Na seguinte seção será apresentado o procedimento de cálculo realizado em planilhas do Excel para obtenção dos resultados de separação de perdas.

4.3.1. Utilização da ferramenta *solver* do Excel para separação de perdas

O método de resolução para separar os tipos de perdas através do cálculo dos coeficientes dos modelos estudados foi realizado através da ferramenta do Excel chamada

solver. Dentre outras atribuições, esta ferramenta possibilita a determinação de valores de parâmetros de uma função através de um objetivo pré-definido.

Pode-se explicar o funcionamento do *solver* (simplificadamente) da seguinte maneira: define-se uma célula objetivo para o *solver* maximizar (ou minimizar) ou definir um valor previamente determinado pelo usuário. Escolhido o objetivo, definem-se quais células o processador irá variar para atingir o objetivo especificado, no qual o usuário pode também impor condições ou restrições. Pode-se também escolher o método de resolução dos problemas. Neste trabalho, foi utilizado o método de solução não linear chamado método do gradiente reduzido generalizado (GRG).

Atingir o maior valor para o coeficiente de determinação R^2 foi escolhido como o objetivo no processo de alteração dos valores dos parâmetros dos modelos das perdas magnéticas na comparação com os valores experimentais das perdas magnéticas. Este coeficiente é comumente utilizado como medida de ajuste de um modelo em relação a valores observados. O valor do coeficiente de determinação (4.8) é calculado através da normalização da divisão entre os valores de soma dos quadrados dos resíduos SQR (4.9) e a soma total dos quadrados STQ (4.10). Em (4.9) e (4.10), n equivale ao número total de pontos da curva (dados de perdas, neste caso), y_i equivale ao valor experimental medido, $y_{calc i}$ equivale ao valor calculado para um determinado modelo e \bar{y} é o valor médio de todos os valores experimentais de uma curva.

$$R^2 = 1 - \frac{SQR}{STQ} \quad (4.8)$$

$$SQR = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{calc i})^2 \quad (4.9)$$

$$STQ = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.10)$$

Utilizando o procedimento do *solver*, foram calculados os coeficientes dos modelos com separação de perdas, objetivando que o valor de R^2 seja o mais próximo à unidade.

Pode-se descrever o processo realizado de separação de perdas da seguinte maneira:

- Obter a curva de perdas totais (medições a 100 Hz);
- Obter a curva de perdas por histerese (medições a 1 Hz);
- Escolher os modelos de representação de cada tipo de perdas;
- Realizar o processo de separação das perdas totais entre perdas dinâmicas e perdas por histerese;
- Fixar o coeficiente e o expoente do modelo das perdas dinâmicas;

- Realizar o processo de separação das perdas totais entre perdas por histerese, clássicas e excedentes, condicionando que a soma das perdas clássicas com as perdas excedentes tenha o mesmo valor de perdas dinâmicas previamente calculadas;
- Fixar o valor do coeficiente de perdas clássicas para a condição de 0 MPa (procedimento e validação desta hipótese são explicados em detalhe no Capítulo 6);
- Realizar o processo de separação das perdas totais entre perdas por histerese e perdas excedentes para os demais níveis de carregamento mecânico, onde os valores dos parâmetros das perdas clássicas são mantidos fixos na condição de 0 MPa.

Para validar a metodologia de separação de perdas, foram realizados dois procedimentos descritos a seguir:

1. Utilizando uma curva de pontos medidos em 1 Hz na bancada magnetomecânica, comparou-se os valores dos parâmetros do modelo de potência ($W = KB^\alpha$) encontrados por dois métodos: i) valores determinados através da ferramenta do Excel "curva de tendência" e ii) valores dos parâmetros do modelo determinados através do procedimento normalmente empregado nesta dissertação utilizando a ferramenta *solver*. Estes procedimentos de comparação foram realizados para os ensaios em todos os níveis de esforços mecânicos da amostra de direção de corte de 0°. Os valores do coeficiente K obtidos com os dois métodos e nas diferentes tensões mecânicas foram próximos (diferenças de até 10%). Os valores do expoente α obtidos pelos dois métodos foram relativamente próximos quando aplicados esforços de tração, no caso sem aplicação de esforços e em 5 MPa de compressão (diferenças inferiores a 10%). Quando aplicados esforços de compressão de 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, as diferenças entre os valores de α foram mais elevadas (15%, 21% e 23%, respectivamente). Entretanto, quando comparados os valores de perdas obtidos com os coeficientes encontrados pelos dois métodos para os casos em que se encontraram as maiores diferenças relativas entre os expoentes do modelo de potência (em 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de compressão), os resultados obtidos com a metodologia empregada tiveram diferenças entre valores de perdas do modelo e experimentais inferiores a 6%, enquanto que as diferenças obtidas pelo modelo que calcula os parâmetros pela curva de tendência chegaram a 30%, nas faixas de indução de 0,3 T

a 1,5 T. Maiores detalhes sobre esta busca de validação da metodologia se encontra no APÊNDICE A.

2. Para os casos sem esforços e com os dados de ensaios nas frequências de 100 Hz e 3 Hz realizados pela bancada comercial Brockhaus® MPG200, realizou-se uma comparação entre valores de perdas dinâmicas e de histerese fornecidos pelo método de separação próprio da bancada Brockhaus® e valores de perdas dinâmicas e de histerese obtidos pela metodologia de separação de perdas utilizada nesta dissertação. Apesar de utilizar a curva obtida em 3 Hz para a perda por histerese no emprego da metodologia de separação de perdas desta dissertação (sabe-se que há uma parcela maior de perda dinâmica nesta frequência), as diferenças relativas percentuais entre os dois métodos de representação das perdas dinâmicas, para pontos de indução entre 0,4 T e 1,4 T, foram inferiores a 12%. Detalhes sobre os resultados obtidos nesta análise são também apresentados no APÊNDICE A.

No próximo capítulo, os resultados encontrados nesta dissertação são apresentados e analisados

5. ENSAIOS E ANÁLISES DA INFLUÊNCIA DOS ESFORÇOS MECÂNICO NAS CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DO MATERIAL

Neste capítulo, serão apresentados resultados e análises de características magnéticas das amostras siliciosas de grão não orientado, com angulações entre direção de corte e direção de laminação de 0°, 45° e 90°. Os resultados dos ensaios foram obtidos sem e com imposições de esforços mecânicos de tração e de compressão. Os ensaios foram realizados nas frequências de 1 Hz, 50 Hz e 100 Hz, e os níveis de carregamentos mecânicos impostos foram de 0 MPa (sem esforços), 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa. Este capítulo é dividido em quatro seções:

- Na primeira seção são comparados laços de perdas nas frequências de 1 Hz, 50 Hz e 100 Hz para as três amostras com direções de corte diferentes. Nesta seção, é realizada uma avaliação das três amostras de mesmo material com diferentes direções de corte sob a influência dos esforços impostos. São também realizadas análises (para as três amostras separadamente) sobre a variação dos laços de perdas em função do tipo (tração e compressão) e dos níveis de esforços mecânicos aplicados.

- A segunda e a terceira seção apresentam, respectivamente, a influência dos esforços mecânicos nos valores de campo coercitivo e nos valores da indução remanente das amostras analisadas.

- Na quarta seção são apresentados resultados abordando a permeabilidade magnética relativa das três amostras em função dos esforços mecânicos aplicados.

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos para as análises da influência do esforço mecânico nas características magnéticas (presente capítulo) e nos parâmetros de separação de perdas (Capítulo 6), foram realizadas duas validações de resultados obtidos na bancada magnetomecânica. As comparações realizadas consistiram em:

1. Comparação entre resultados de caracterização magnética, sem aplicação de esforços mecânicos, nas frequências de 3 Hz, 50 Hz e 100 Hz, obtidos com as amostras ensaiadas na bancada magnetomecânica e entre resultados de caracterização magnética obtidos com as amostras ensaiadas na bancada *Brockhaus*®. Foram comparados resultados em amostras com direções de corte de 0° e de 90°, mas devido aos equipamentos serem diferentes, as amostras ensaiadas nas duas bancadas possuem dimensões distintas (rigorosamente, apesar de serem do mesmo material comercial e estampadas na mesma direção, elas podem ser levemente diferentes no

comportamento magnético). Os resultados obtidos de diferença relativa para valores de perdas magnéticas totais entre as duas bancadas foram inferiores a 9% para as amostras de direção longitudinal e inferiores a 16% nas amostras transversais, para valores de indução entre 0,5 T e 1,5 T. Os resultados de diferença relativa para valores eficazes de campo magnético entre as duas bancadas foram inferiores a 11% entre as amostras longitudinais e inferiores a 15% entre as amostras transversais para induções magnéticas entre 0,4 T e 1,4 T. Maiores detalhes são encontrados no APÊNDICE B.

2. Comparação entre resultados de obtenção de perdas magnéticas realizados apenas na bancada de esforços mecânicos para duas amostras (um par para cada direção de estampagem: 0°, 45° e 90°) de mesmo material e com mesma direção de corte, e submetidas aos níveis de esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, nas induções magnéticas de 0,5 T, 0,8 T e 1 T, na frequência de 1 Hz. As diferenças relativas percentuais de perdas magnéticas entre as amostras do par com direção de corte de 0° foram inferiores a 15%. As diferenças relativas entre as amostras do par com direção de corte de 45° foram inferiores a 16%. As diferenças relativas percentuais entre as perdas magnéticas do par de amostras de 90° foram inferiores a 17%. Tem-se mais detalhes no APÊNDICE B.

As diferenças obtidas podem advir das diferenças magnéticas e metalúrgicas intrínsecas entre as amostras do par, da homogeneidade das espessuras e dos cortes das amostras, da diferença entre os ensaios na imposição dos esforços (na ordem de 10 N ou 0,20 MPa) e de alterações possíveis de fluxos dispersos devido às montagens da bancada e de acondicionamento da lâmina. Convém notar que, mesmo para amostras consideradas semelhantes, há uma diferença relativa na ordem de 15%. Isto deve ser levado em consideração nas análises realizadas neste e no próximo capítulo, apesar de não ser possível quantificar sua influência. Alheio a isto, deve-se levar em conta que na comparação de amostras diferentes com as diferentes bancadas, as diferenças também ficaram nesta ordem de grandeza. Pode-se inferir que a bancada magnetomecânica está medindo os valores de maneira satisfatória. Uma análise metrológica da bancada não foi um objetivo deste trabalho, mas seria um estudo a ser realizado.

5.1. INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NOS LAÇOS DE PERDAS MAGNÉTICAS

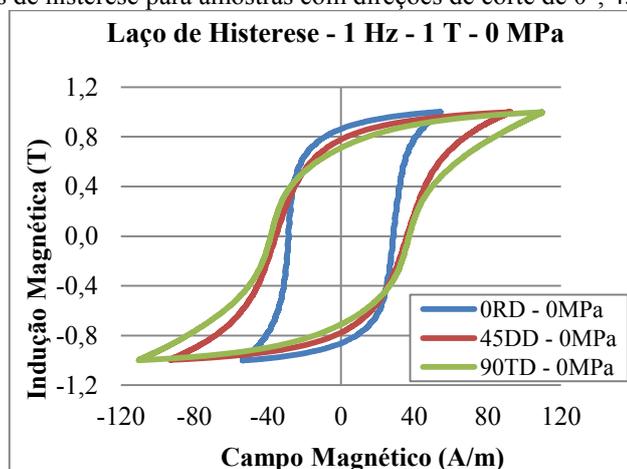
Nesta seção serão realizadas duas análises. Na primeira seção, comparam-se laços de perdas magnéticas das três amostras nos mesmos níveis de esforços mecânicos e posteriormente, na segunda seção, analisam-se os laços de perdas magnéticas em todos os níveis de carregamentos aplicados para uma mesma amostra.

5.1.1. Comparação entre os laços de perdas das três amostras analisadas

Como discutido na seção 2.1.2, as chapas de aço elétrico GNO não possuem uma textura definida pronunciada, possuindo globalmente características isotrópicas. Espera-se, portanto, que as amostras tenham propriedades magnéticas próximas, independentemente da direção de corte.

Serão apresentados laços de histerese (perdas magnéticas obtidas em 1 Hz) e laços BH (perdas magnéticas totais obtidas em 50 Hz) das amostras com direções de corte em 0° (0RD), 45° (45DD) e 90° (90TD), em 1 T de indução magnética, com e sem esforços mecânicos. Na Figura 5.1 são apresentadas as curvas de perdas a 1 Hz e sem aplicação de esforços mecânicos. Nesta figura, observa-se que os laços de histerese das três amostras possuem comportamento de formatos semelhantes. A amostra longitudinal (laço na cor azul) possui uma área significativamente menor que as outras duas amostras (diagonal - laço na cor vermelha - e transversal - laço na cor verde). As diferenças percentuais relativas das perdas magnéticas das amostras 45DD e 90TD em relação à perda da amostra 0RD são, respectivamente, 22% e 34%.

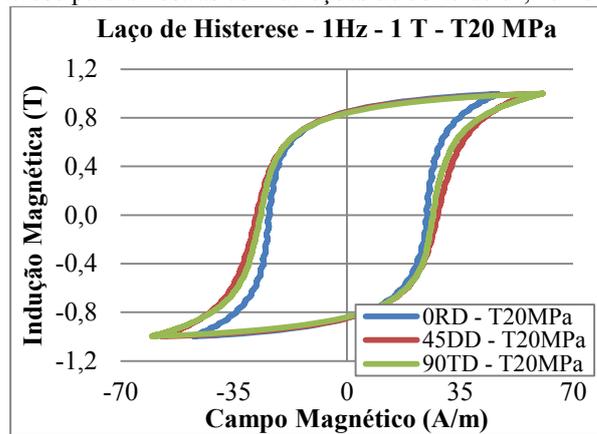
Figura 5.1: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0° , 45° e 90° em 0 MPa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quando as amostras foram submetidas à tração, o comportamento do formato dos laços de perdas se modificou. Na Figura 5.2 são apresentados os laços de histerese para as amostras com direção de corte de 0° , 45° e 90° , quando aplicados 20 MPa de tração. Observa-se que os formatos dos laços ficaram mais próximos entre si quando comparadas com o caso anterior (sem esforços mecânicos), apresentado na Figura 5.1. As diferenças percentuais entre as perdas das amostras 45DD e 90TD em relação a 0RD, com 20 MPa de tração, são de 15% e 14%, respectivamente.

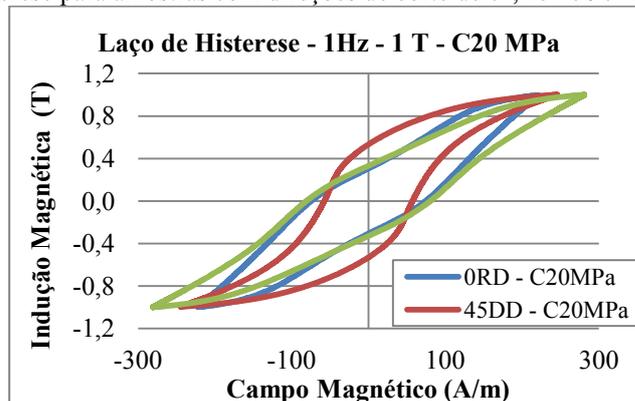
Figura 5.2: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0° , 45° e 90° em 20 MPa de tração.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.3 são apresentadas as curvas de perdas a 1 Hz para as três amostras quando submetidas a 20 MPa de compressão. Observa-se nesta figura que o comportamento dos formatos dos laços mudou consideravelmente quando comparados com os casos sem esforços e com 20 MPa de tração. Os formatos dos laços são mais semelhantes entre si nas amostras com direções de 0° (laço na cor azul) e 90° (laço na cor verde). Porém, a diferença relativa dos valores das perdas magnéticas entre as amostras com direção de 45° (laço na cor vermelha) e 0° foi de apenas 1%, enquanto que entre as amostras de 90° e 0° , a diferença foi de 10%.

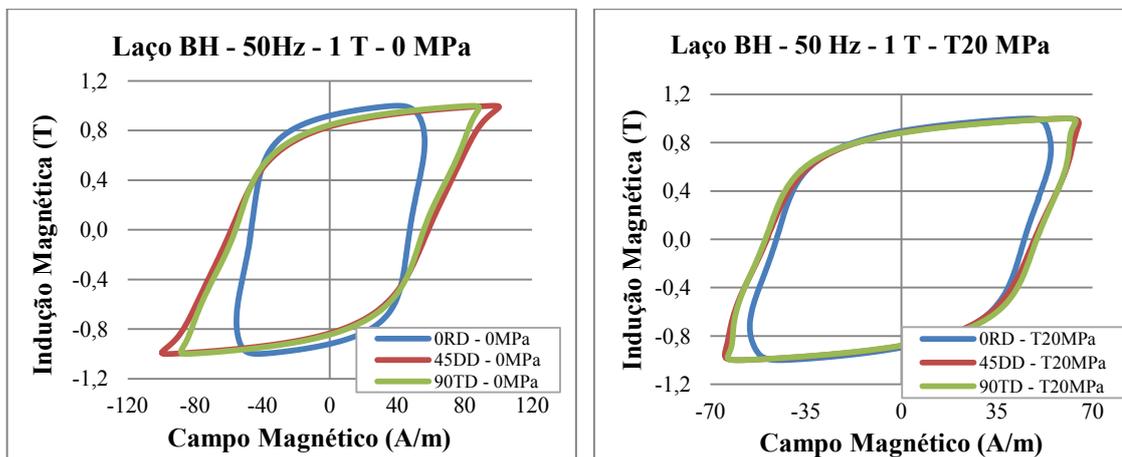
Figura 5.3: Laços de histerese para amostras com direções de corte de 0° , 45° e 90° em 20 MPa de compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

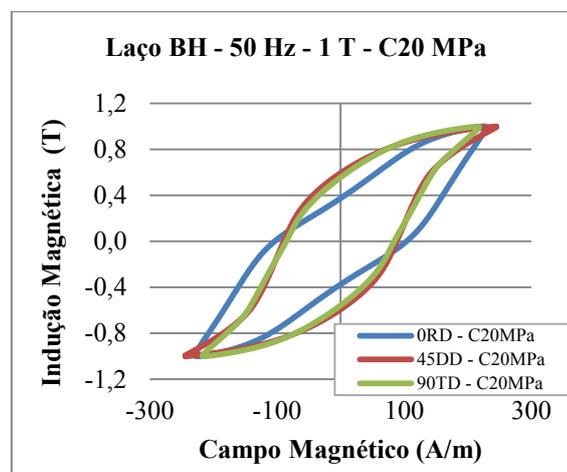
Na Figura 5.4 são apresentados os laços BH obtidos em 50 Hz e 1 T das amostras com direções de corte longitudinal, transversal e diagonal, para 0 MPa e para 20 MPa de tração (T20 MPa) e de compressão (C20 MPa). Na Figura 5.4(a), tem-se os laços de perdas para o caso sem esforço, na Figura 5.4(b) os laços de perdas em 20 MPa de tração e na Figura 5.4(c) os laços de perdas em 20 MPa de compressão. Observa-se na Figura 5.4(a) que o laço da amostra 0RD (laço na cor azul) possui formato diferente das amostras 45DD (laço na cor vermelha) e 90TD (laço na cor verde). Nota-se que as modificações do comportamento dos formatos ocorridas nos laços BH das três amostras devido ao carregamento mecânico em 50 Hz foram semelhantes às modificações dos casos analisados em 1 Hz.

Figura 5.4: Laços BH a 50Hz e 1 T das amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.



(a)

(b)



(c)

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se concluir, com as análises realizadas até então, que o carregamento mecânico aplicado às amostras modifica o comportamento dos laços BH, como consta na literatura. Quando aplicado um esforço mecânico de 20 MPa de tração, as três amostras tiveram laços com formatos próximos, ou seja, apresentaram características magnéticas com comportamento mais isotrópico do que sem esforço e com compressão (que mantiveram certo grau de anisotropia visto na comparação dos formatos dos laços).

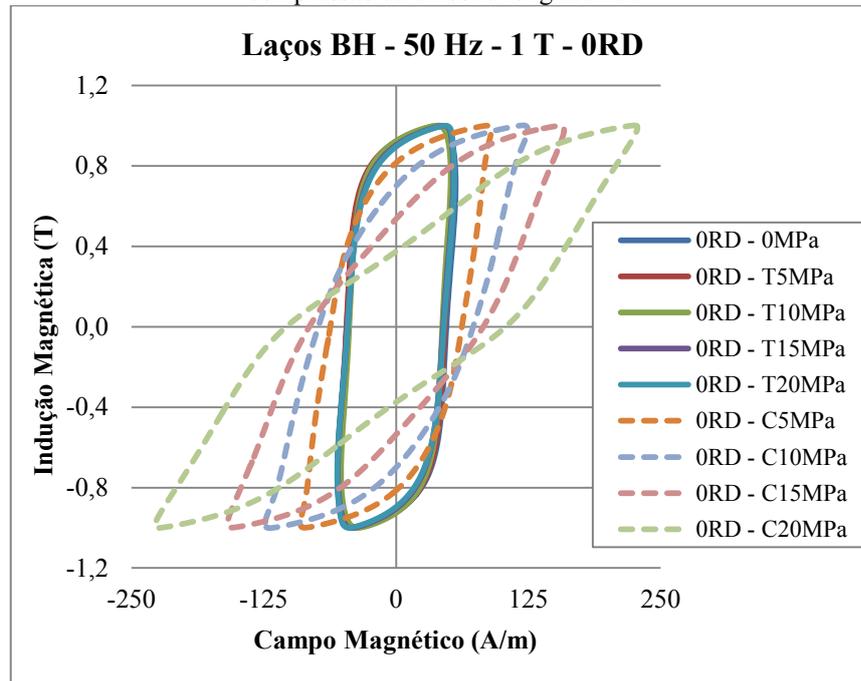
Na seção seguinte será apresentado o comportamento das perdas magnéticas totais quando submetidas a todos os níveis de esforços mecânicos aplicados.

5.1.2. Influência de esforços mecânicos nos laços de perdas magnéticas em cada amostra individualmente

Foram aplicados esforços de tração e compressão nas intensidades de 5 MPa a 20 MPa (com passo de 5 MPa). Os ensaios foram realizados para as amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° nas frequências de 1 Hz, 50 Hz e 100 Hz. A fim de mostrar visualmente a influência dos esforços mecânicos aplicados nas amostras ensaiadas, escolheu-se alguns dos resultados de todos os ensaios realizados no desenvolvimento desta dissertação, sendo que cada figura a seguir apresenta laços de uma só amostra. Os laços são para diferentes frequências e/ou níveis de indução magnética.

Na Figura 5.5 são apresentados os laços de perdas em 50 Hz e 1 T da amostra ORD para os níveis de esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, em tração e compressão. Nesta figura, quando aplicados esforços de tração (laços com linhas contínuas), os laços se sobrepõem praticamente em todos os níveis, próximos ao caso sem aplicação de esforço. Contrariamente, quando são aplicadas intensidades de esforços em compressão (laços em linhas tracejadas), vê-se claramente que os laços se modificam (em relação ao caso sem esforço) com maior intensidade conforme o nível de compressão aumenta.

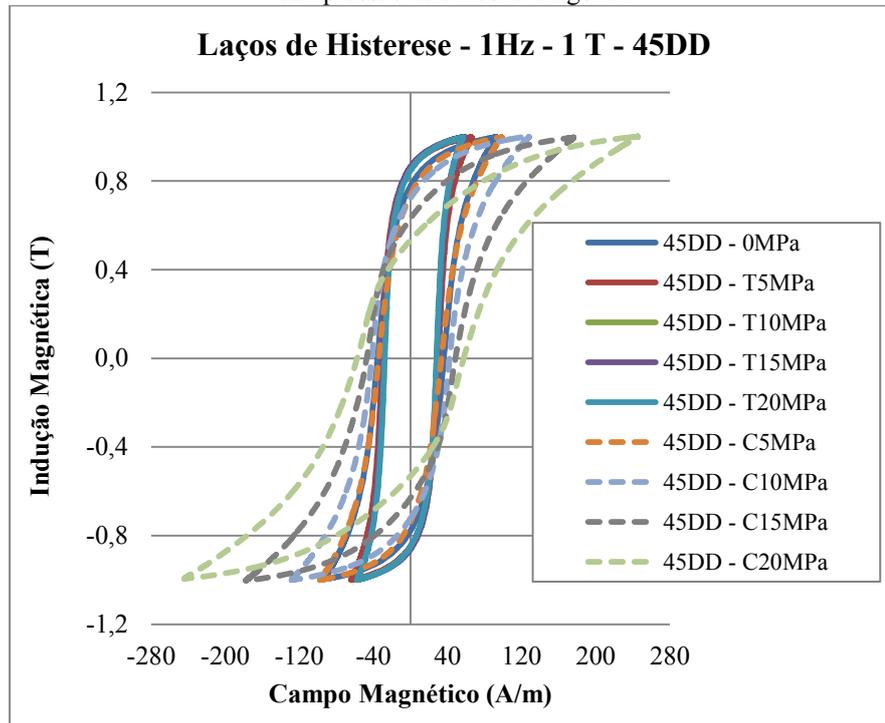
Figura 5.5: Laços BH em 50 Hz e 1 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra longitudinal.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.6 são mostrados os laços de histerese em 1 T da amostra 45DD para os níveis de esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, em tração e em compressão. Nesta figura, os laços de perdas de histerese em linhas contínuas indicam os laços em tração e também o caso sem esforços, e em linhas tracejadas em compressão. Observa-se na Figura 5.6 que os laços de histerese em tração são menores do que no caso sem esforços (linha contínua na cor azul escuro) e que há uma modificação significativa nos valores de campo magnético dos laços conforme se aumentam os níveis de esforços de compressão.

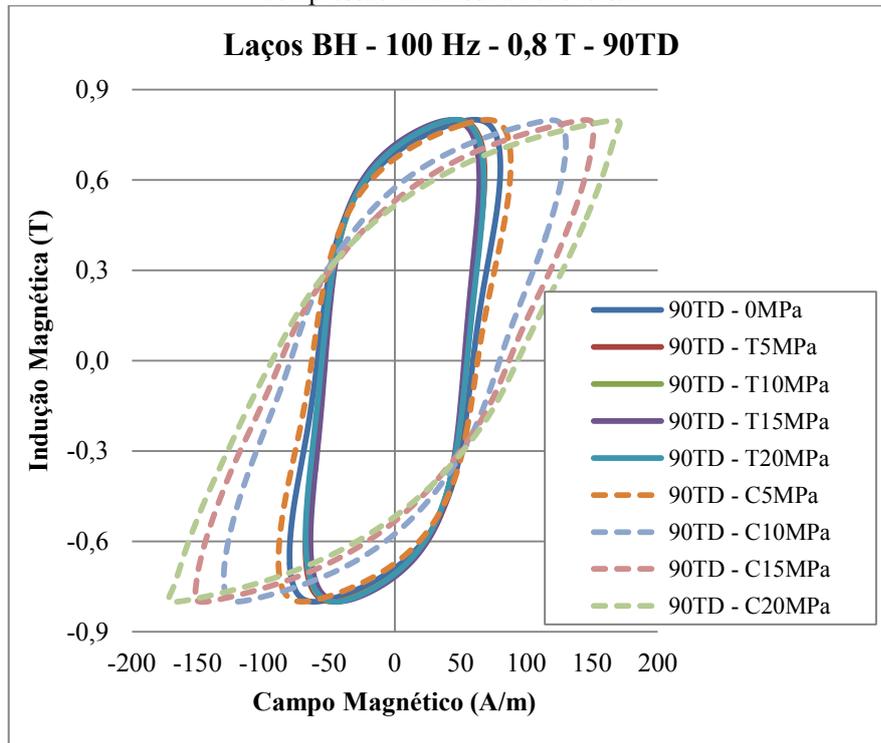
Figura 5.6: Laços de histerese em 1 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra diagonal.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.7 são apresentados os laços BH da amostra 90TD para 100 Hz e 0,8 T obtidos em todos os níveis de esforços mecânicos aplicados. Nota-se que os laços de perdas tiveram comportamentos semelhantes às demais amostras (Figura 5.5 e Figura 5.6), nos quais os laços de perdas em tração ficaram aproximadamente sobrepostos e, quando aplicados esforços de compressão, houve modificações nos formatos dos laços de perdas os a intensidade de campo é maior com o aumento do carregamento aplicado.

Figura 5.7: Laços BH em 100 Hz e 0,8 T para esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa de tração e compressão da amostra transversal.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

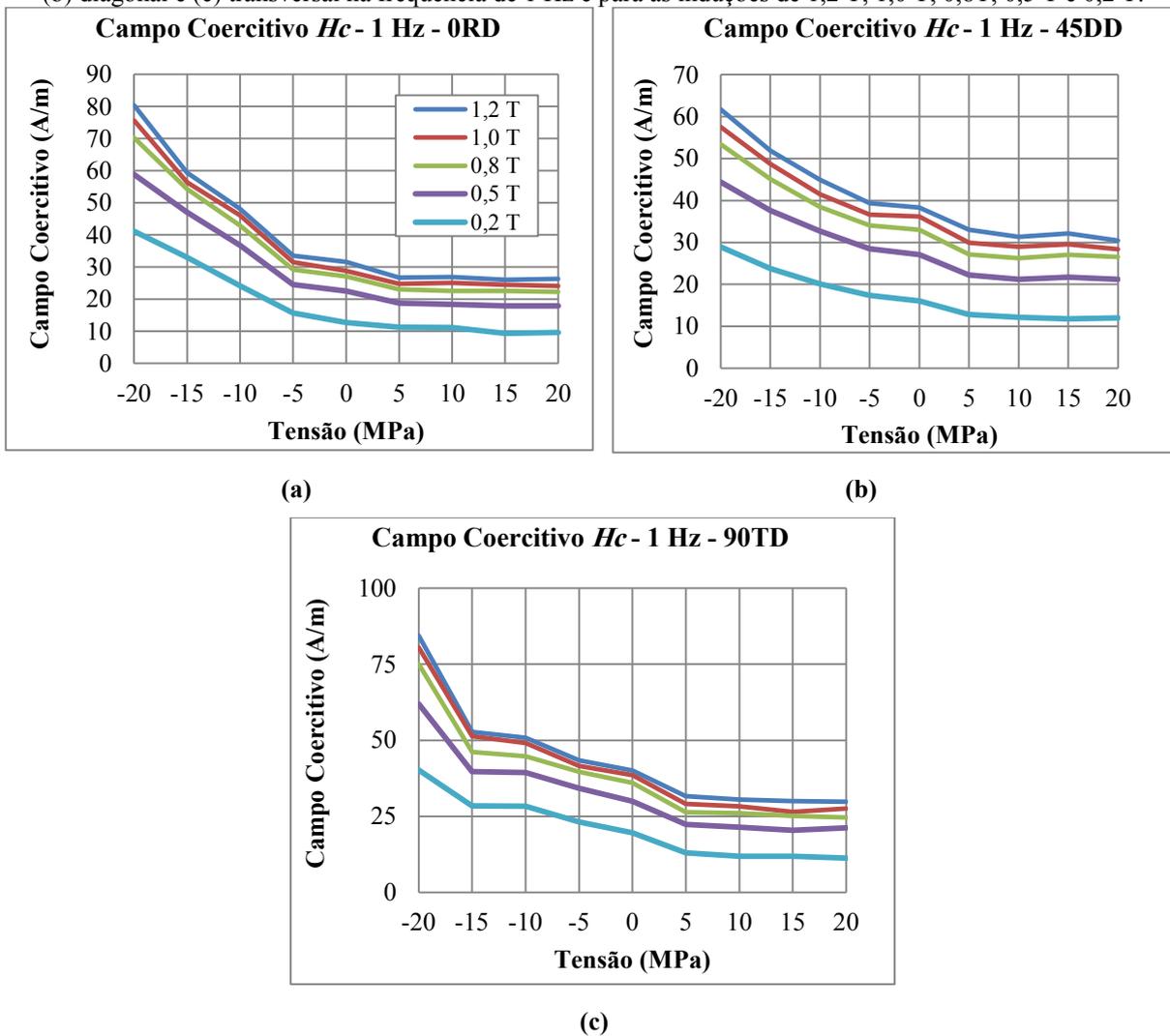
Os resultados de laços BH apresentados mostram que há variações no comportamento dos formatos dos laços de perdas com a aplicação de esforços mecânicos que, em geral, são mais intensas em esforços de compressão. Nestes resultados apresentados, nota-se também que as modificações nas formas dos laços de perdas acarretam variações nos valores de campo coercitivo e de indução remanente do material. Um detalhamento destas modificações nestes dois valores é apresentado nas próximas duas seções.

5.2. INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NO CAMPO COERCITIVO

O campo coercitivo H_c é o valor do campo magnético quando a indução magnética é nula. Na Figura 5.8 são apresentadas as variações no campo coercitivo para os esforços mecânicos aplicados nas amostras com direção de corte de (a) 0° , (b) 45° e (c) 90° em valores de indução magnética de 0,2 T, 0,5 T, 0,8 T, 1,0 T e 1,2 T. Para esta figura (e para as demais semelhantes) são utilizados valores negativos na escala de tensão mecânica para indicar esforços de compressão. Nesta figura se observa que o campo coercitivo teve comportamento semelhante para as três amostras com diferentes direções de corte: ocorre um aumento expressivo nos valores de H_c em compressão e, quando aplicados esforços de tração, há uma pequena redução nos valores de campo coercitivo em comparação com o caso de 0 MPa (para

todos os níveis de indução magnética). Observando-se os valores de H_c nas figuras, aqueles encontrados para a amostra 45DD (Figura 5.8(b)) são relativamente inferiores aos das duas outras amostras. Por exemplo, para a indução magnética de 1,2 T, os valores de campo coercitivo em 20 MPa de compressão foram de cerca de 60 A/m na amostra 45DD (Figura 5.8(b)), cerca de 80 A/m na amostra ORD (Figura 5.8(a)) e cerca de 85 A/m na amostra 90 TD (Figura 5.8(c)).

Figura 5.8: Variação do campo coercitivo em função do esforço mecânico aplicado nas amostras (a) longitudinal, (b) diagonal e (c) transversal na frequência de 1 Hz e para as induções de 1,2 T, 1,0 T, 0,8 T, 0,5 T e 0,2 T.

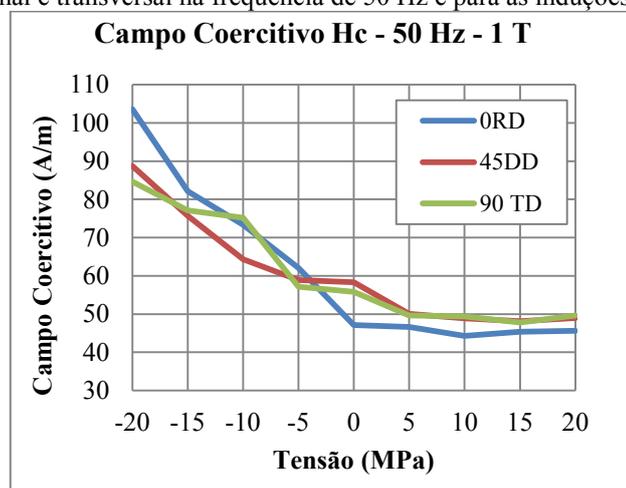


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A fim de realizar-se uma comparação mais específica entre as três amostras com diferentes direções de corte, são apresentados os valores de campo coercitivo para as amostras ORD, 45DD e 90TD em 50 Hz e 1 T na Figura 5.9. Observa-se que a amostra ORD (linha na cor azul) teve a maior variação de valores de campo coercitivo. Os valores de campo

coercitivo para as amostras 45DD (linha na cor vermelha) e 90TD (linha na cor verde) foram mais semelhantes entre si para ambos os esforços de tração e compressão.

Figura 5.9: Variação do campo coercitivo em função do esforço mecânico aplicado nas amostras longitudinal, diagonal e transversal na frequência de 50 Hz e para as induções de 1 T.



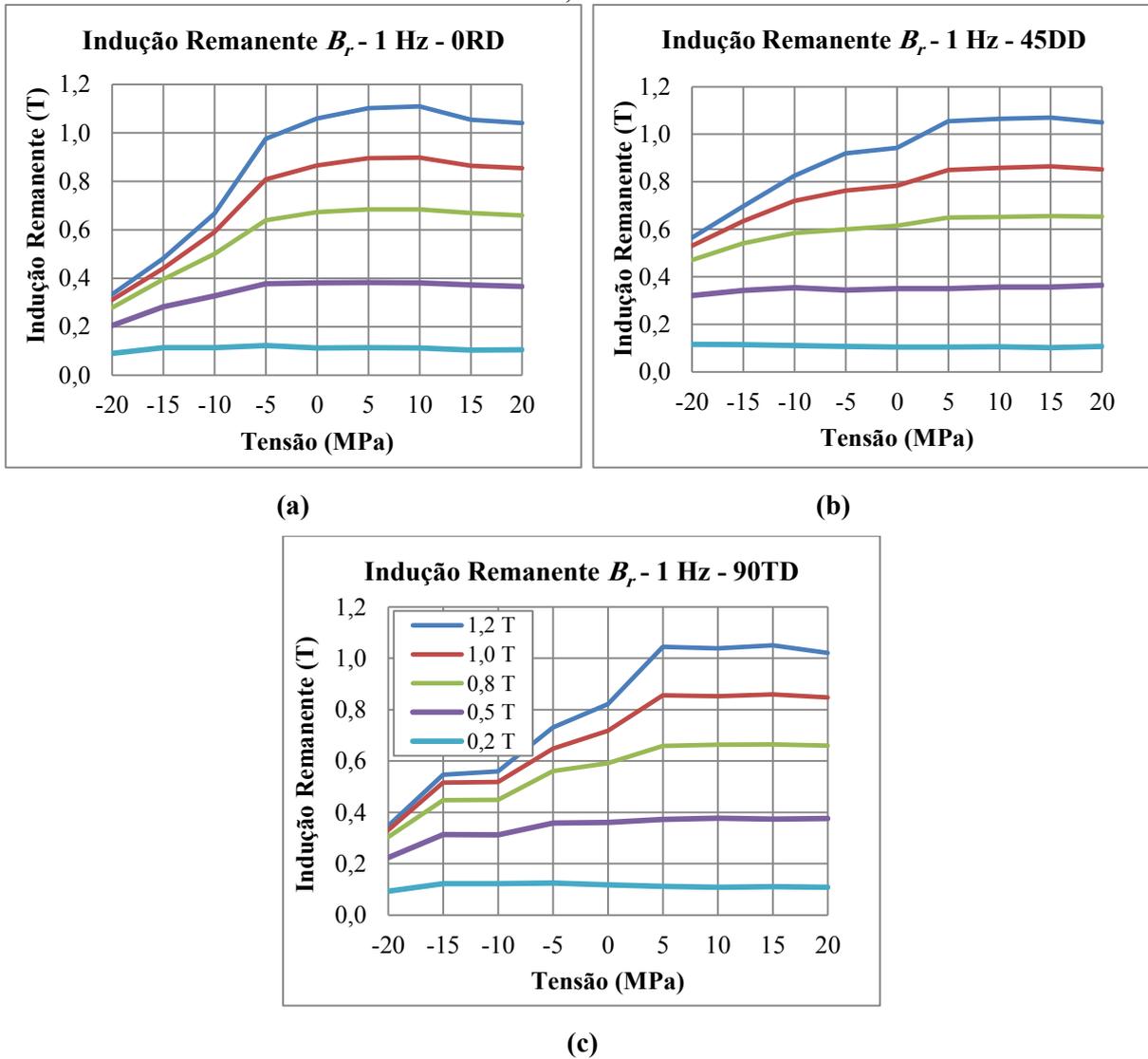
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na próxima seção, é apresentada a variação da indução remanente em função dos esforços mecânicos aplicados.

5.3. INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NA INDUÇÃO REMANENTE

A indução remanente é o valor da indução magnética quando o campo magnético é nulo. Na Figura 5.10 é apresentada o comportamento em 1 Hz dos valores de indução remanente, sob influência dos esforços mecânicos, nas direções de corte de (a) 0°, (b) 45° e (c) 90°. Observando as curvas da Figura 5.10(a), Figura 5.10(b) e Figura 5.10(c), nota-se que a redução mais significativa em compressão, quando comparada ao caso de 0 MPa, deu-se na amostra 0RD (Figura 5.10(a)). Nas três amostras analisadas, observa-se que há uma redução significativa nos valores da indução remanente quando aplicados esforços de compressão. Analisando os valores em tração, observa-se que há um aumento inicial mais pronunciado em 5 MPa com relação a 0 MPa, um pequeno aumento em 10 MPa com relação a 5 MPa e reduções em 15 MPa e 20 MPa. Estas variações dos valores de B_r em tração são mais evidentes na amostra 0RD (Figura 5.10(a)).

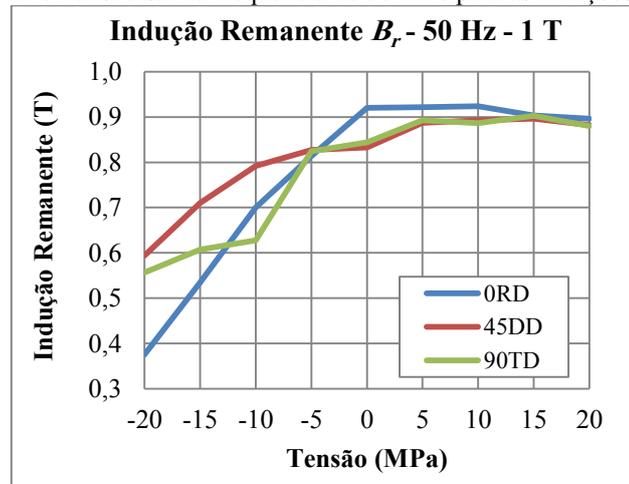
Figura 5.10: Variação da indução remanente em função do esforço mecânico aplicado nas amostras (a) longitudinal, (b) diagonal e (c) transversal na frequência de 1 Hz e para as induções de 1,2 T, 1,0 T, 0,8 T, 0,5 T e 0,2 T.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.11 são apresentados os valores de indução remanente em função dos níveis de esforços mecânicos aplicados para as amostras 0RD, 45DD e 90TD na indução de 1 T e frequência de 50 Hz. A comparação dos valores de B_r , confirma as constatações realizadas analisando a Figura 5.10, onde a diminuição mais abrupta dos valores de indução remanente em compressão se deu para a amostra 0RD (curva na cor azul). Quando aplicados esforços de tração para as três amostras, os valores de indução remanente praticamente não se alteraram e ficaram próximos do caso sem aplicação de esforços mecânicos. Nesta frequência, nota-se bem o aumento do valor da indução remanente em 5 MPa (com relação a 0 MPa) e o decréscimo em 20 MPa (em relação a 15 MPa) principalmente nas amostras 45DD e 90TD.

Figura 5.11: Variação da indução remanente em função do esforço mecânico aplicado nas amostras longitudinal, diagonal e transversal na frequência de 50 Hz e para as induções de 1 T.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

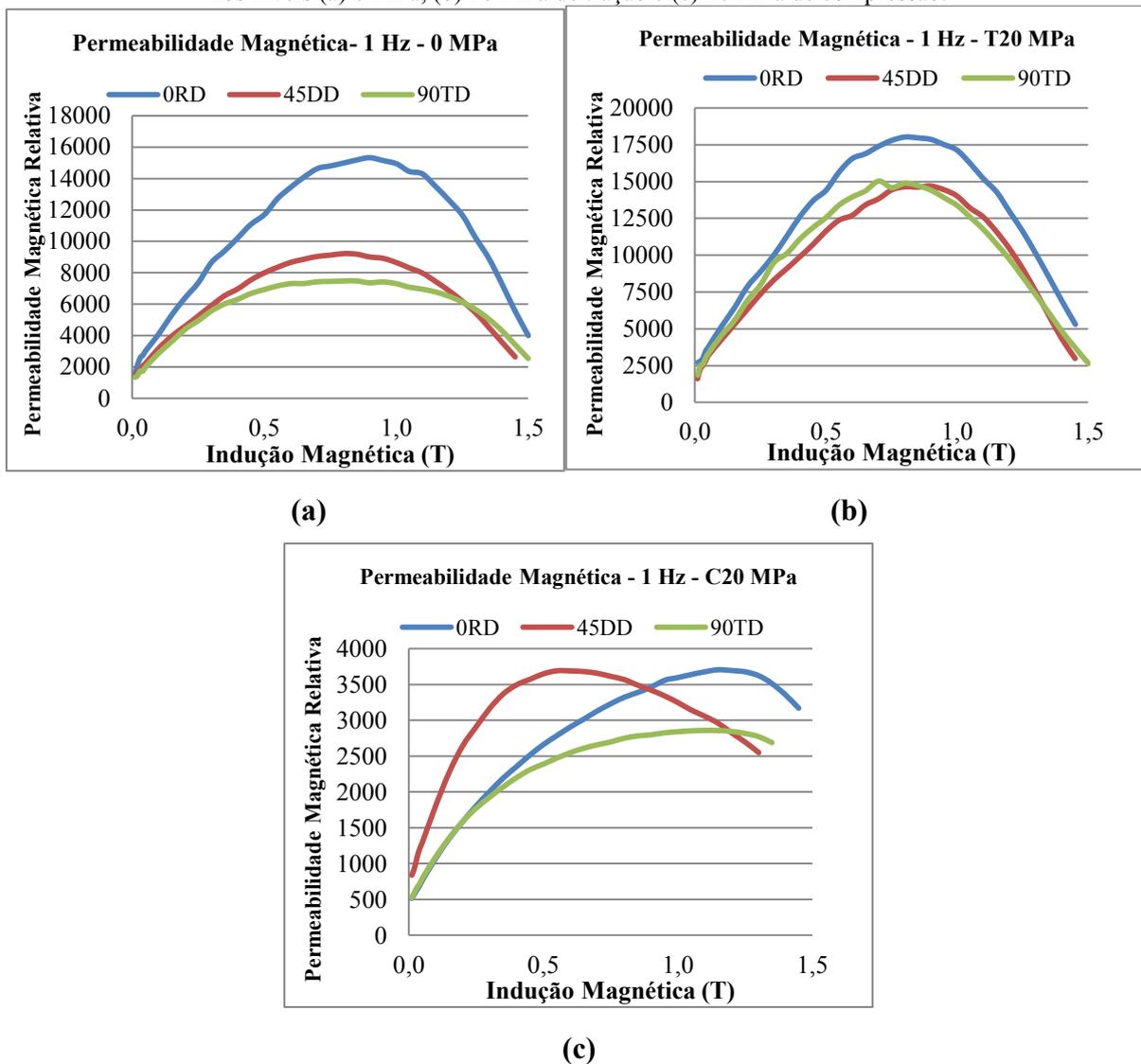
5.4. INFLUÊNCIA DE ESFORÇOS MECÂNICOS NA PERMEABILIDADE RELATIVA

A fim de analisar o comportamento da permeabilidade relativa das amostras em relação à direção de corte do material e à intensidade do carregamento mecânico aplicado, foram feitas duas comparações: i) análise da permeabilidade magnética das três amostras para uma mesma intensidade de esforço mecânico e ii) análise da variação da permeabilidade de cada amostra (separadamente) quando aplicadas os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, em tração e compressão.

Na Figura 5.12 são apresentados os resultados de permeabilidade magnética relativa a 1 Hz para as amostras 0RD, 45DD e 90TD quando aplicados (a) nenhum esforço mecânico (0 MPa), (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão. Na Figura 5.12(a), tem-se os resultados de permeabilidade magnética relativa das três amostras quando não foram aplicados esforços mecânicos. Observa-se que existe uma diferença considerável nessa característica da amostra 0RD (curva na cor azul) quando comparada com as permeabilidades magnéticas relativas das amostras 45DD (curva na cor vermelha) e 90TD (curva na cor verde). Na Figura 5.12(a) se pode ainda observar que a permeabilidade relativa máxima ocorre nas três amostras por volta de 0,85 T. Em 0 MPa, os valores de permeabilidade máxima relativa das amostras 0RD, 45DD e 90TD foram cerca de 15000, 9000 e 7000, respectivamente. Na Figura 5.12(b) são mostrados os resultados comparativos de permeabilidade relativa a 1 Hz quando aplicados 20 MPa de tração. Neste caso, observa-se que a amostra com maior permeabilidade continuou sendo 0RD (curva na cor azul), e a diferença entre as curvas das amostras 45DD (curva na cor vermelha) e 90TD (curva na cor

verde) não foi significativa. Em 20 MPa de tração (Figura 5.12(b)), a permeabilidade relativa máxima ocorreu para as três amostras em cerca de 0,8 T e seus valores foram aproximadamente 18000 para a amostra 0 RD e 15000 para as amostras 45DD e 90TD. Quando aplicado uma tensão de compressão de 20 MPa (Figura 5.12(c)), percebe-se que houve uma variação significativa do ponto de máxima permeabilidade relativa entre as amostras. Na amostra 45DD (curva na cor vermelha), permeabilidade máxima ocorreu em 0,55 T, já nas amostras 0RD e 90TD, a permeabilidade máxima ocorreu por volta de 1,1 T. Além disso, a diferença dos valores de permeabilidade máxima relativa das amostras 0RD e 45DD não foi muito significativa (cerca de 0,4%) enquanto que entre as amostras 90 TD e 0RD (ou 45DD) foi por volta de 23%.

Figura 5.12: Permeabilidade magnética relativa para as amostras com direções de corte de 0°, 45° e 90° a 1 Hz nos níveis (a) 0 MPa, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.

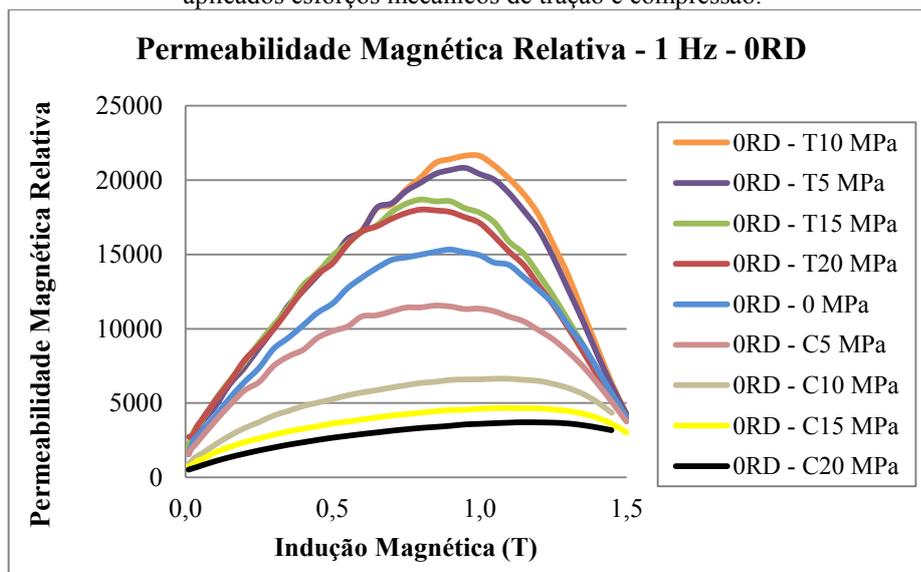


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pelos resultados apresentados na Figura 5.12, pode-se concluir que a permeabilidade magnética relativa é afetada pelos esforços mecânicos aplicados e que o comportamento da permeabilidade das três amostras foi diferente. A fim de avaliar o comportamento na permeabilidade magnética em função dos esforços mecânicos aplicados em cada amostra individualmente, são apresentados nas seguintes figuras os resultados de permeabilidade relativa para as amostras longitudinal, diagonal e transversal.

Na Figura 5.13 são apresentadas as curvas de permeabilidade relativa para a amostra ORD em 1 Hz quando submetida aos esforços de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, além do caso sem esforços mecânicos (0 MPa). Quando aplicados esforços de tração, a permeabilidade magnética relativa máxima do material sofreu aumentos, atingindo seu máximo valor (nos pontos medidos) em 0,95 T (cerca de 21000, equivalente a um aumento de 18% em relação à permeabilidade máxima relativa sem esforços) em 10 MPa (curva na cor laranja). Note que aumentando o esforço de tração além do ponto medido de 10 MPa, a permeabilidade relativa máxima diminuiu nos demais pontos medidos. Nos casos em que esta amostra foi submetida a esforços de compressão, houve uma diminuição nos valores máximos de 25% quando aplicados 5 MPa de compressão (curva na cor rosa), 57% em 10 MPa (curva na cor cinza), 70% em 15 MPa (curva na cor amarela), e a maior redução foi de 76% e ocorreu em 20 MPa (curva na cor preta).

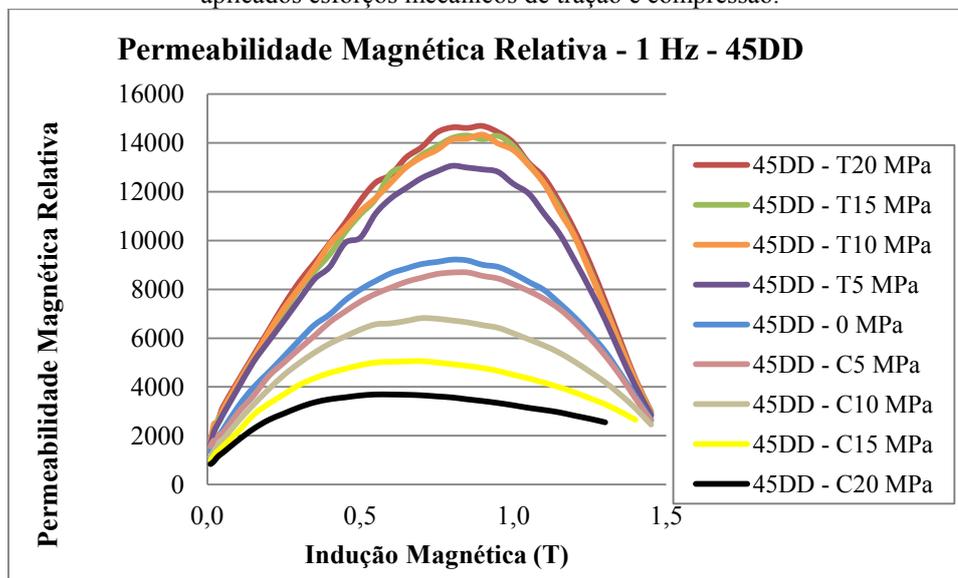
Figura 5.13: Permeabilidade magnética relativa a 1 Hz da amostra com direção de corte longitudinal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.14 são apresentadas as curvas de permeabilidade relativa da amostra 45DD. Nesta amostra, o maior aumento de permeabilidade relativa ocorreu quando foram aplicados 20 MPa de tração (curva na cor vermelha). Em 20 MPa de tração, o valor da permeabilidade magnética relativa máxima foi cerca de 15000 em 0,9 T e equivale a um aumento de 59% em relação ao caso de 0 MPa. As diferenças percentuais entre os valores de permeabilidade relativa máxima para os casos de tração de 20 MPa, 15 MPa e 10 MPa (curvas nas cores vermelha, verde e laranja, respectivamente) foram inferiores a 3%. Quando aplicados esforços de compressão, a redução na permeabilidade relativa máxima (em relação a 0 MPa) foi de 6% quando aplicados 5 MPa (curva na cor rosa), 26% em 10 MPa (curva na cor cinza), 45% em 15 MPa (curva na cor azul clara) e 60% em 20 MPa (curva na cor preta).

Figura 5.14: Permeabilidade relativa magnética a 1 Hz da amostra com direção de corte diagonal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.

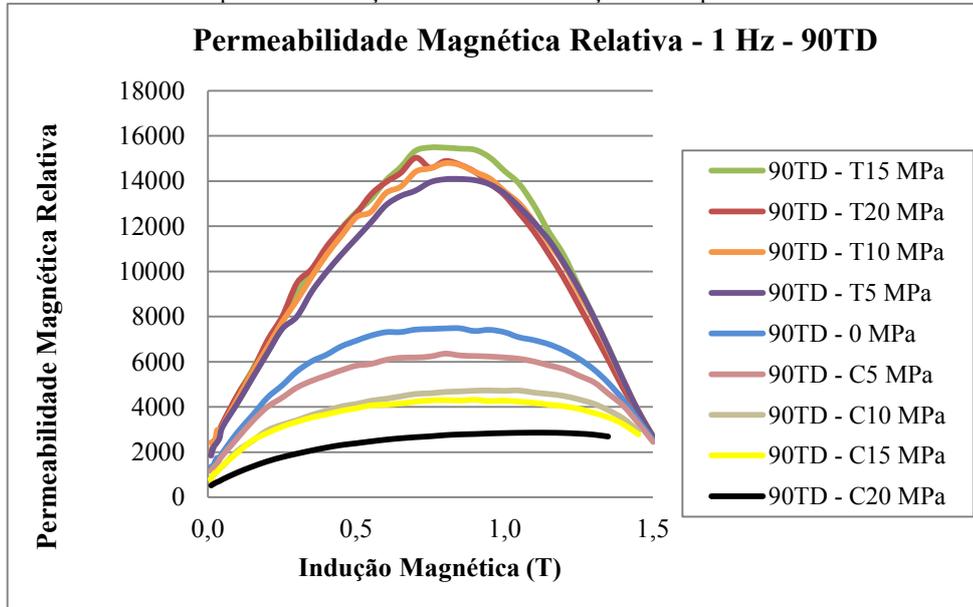


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 5.15 são apresentadas as curvas de permeabilidade magnética relativa da amostra 90TD em 1 Hz quando submetida a diferentes níveis de esforços mecânicos de tração e compressão. Pode-se observar que também houve um aumento significativo na permeabilidade magnética relativa quando aplicados esforços de tração em comparação ao caso de 0 MPa. O valor de permeabilidade relativa mais elevado (cerca de 15500) foi obtido em 15 MPa (curva na cor verde) em 0,75 T e representou um aumento de 107% em relação ao caso de 0 MPa. Nota-se que neste caso, a curva de permeabilidade relativa em 20 MPa de tração (curva na cor vermelha) ficou muito próxima da curva em 10 MPa (curva na cor laranja). Quando aplicados esforços de compressão, as diminuições nos valores de

permeabilidade relativa máxima foram de 15% em 5 MPa (curva na cor rosa), 37% em 10 MPa (curva na cor cinza), 42% em 15 MPa (curva na cor amarela) e 62% em 20 MPa de compressão (curva na cor preta).

Figura 5.15: Permeabilidade magnética relativa a 1 Hz da amostra com direção de corte transversal quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se notar que, em geral, as variações dos valores de permeabilidade relativa tiveram comportamentos similares às variações dos valores da indução remanente. Pois, tanto na permeabilidade relativa, quando na indução remanente, aplicações de esforços de tração e de compressão implicaram respectivamente em aumentos ou degradações de valores.

6. ANÁLISE DE SEPARAÇÃO DE PERDAS

Este capítulo trata da separação dos tipos de perdas magnéticas (perdas totais, por histerese, dinâmicas, clássicas e excedentes), de estudos de modelos e da determinação e comportamento dos valores dos parâmetros dos modelos. O capítulo é dividido em duas partes.

1. Estudo dos modelos de perdas por histerese: os seis métodos abordados em 3.1 serão analisados quando impostos 5 MPa a 20 MPa, em tração e compressão.
2. Separação das perdas dinâmicas em perdas clássicas e perdas excedentes para os níveis de esforços mecânicos aplicados.

Os valores dos parâmetros dos modelos são analisados através de curvas em função do tipo e intensidade de esforço aplicado.

6.1. COMPORTAMENTO DAS PERDAS POR HISTERESE

Para modelar as perdas por histerese, foram medidas as perdas do material em 1 Hz, para três direções de laminação, em todos os níveis de carregamentos aplicados. Os modelos representam as perdas de histerese em [J/kg] e foram analisados pelas diferenças relativas percentuais entre valores de perdas estimadas pelos modelos (para cada valor de indução magnética de pico) em relação aos valores das perdas obtidos experimentalmente, bem como pelo valor do coeficiente de determinação R^2 para cada curva dos modelos de perdas. A Tabela 6.1 resume os seis métodos utilizados para representar as perdas por histerese.

Tabela 6.1: Modelos de representação de perdas por histerese.

Modelo	Formulação
1	$W_h = K_h B_p^\alpha$
2	$W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p}$
3	$W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2}$
4	$W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2 + \alpha_3 B_p^3}$
5	$W_h = x_1 B_p + x_2 B_p^2$
6	$W_h = x_0 + x_1 B_p + x_2 B_p^2 + x_3 B_p^3 + x_4 B_p^4$ $+ x_5 B_p^5 + x_6 B_p^6$

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

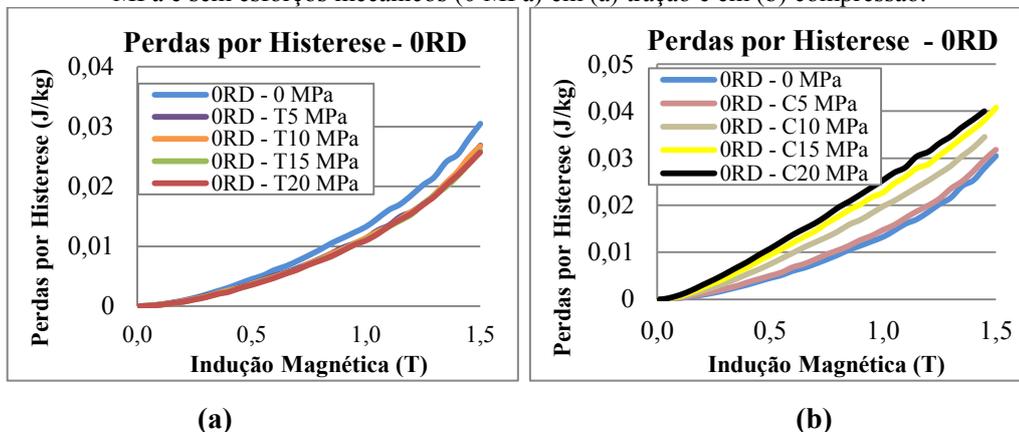
Nas próximas seções serão apresentadas análises e comparações entre os métodos de representação das perdas por histerese para as amostras com direções longitudinal, transversal e diagonal, em tração e compressão. Serão apresentadas tabelas com os valores dos coeficientes de determinação. Nestas tabelas, os maiores valores de R^2 foram colocados em

negrito. Como já aplicado anteriormente, nas legendas das tabelas, as letras T e C seguidas do nível de tensão em MPa indicam, respectivamente, o tipo e a intensidade dos esforços.

6.1.1. Representação das perdas por histerese amostra 0RD

A Figura 6.1 apresenta as curvas de perdas por histerese experimentais da amostra 0RD em trações e compressões de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, bem como sem esforços. Os comportamentos das curvas de perdas por histerese em trações de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa foram semelhantes entre si (vide Figura 6.1(a), onde as curvas roxa, laranja, verde e vermelha praticamente se sobrepõem). Os valores destas perdas para os níveis de tração foram inferiores aos valores de perdas em 0 MPa (curva na cor azul). Quando aplicados esforços de compressão na amostra 0RD, o comportamento das perdas variou conforme se aumentaram os níveis de esforços mecânicos. As curvas de perdas sob compressão são apresentadas na Figura 6.1(b). Observa-se que os valores das perdas foram maiores quando foram impostos 20 MPa de compressão (curva na cor preta) e mais próximas do caso sem esforços quando aplicados 5 MPa de compressão (curva na cor rosa).

Figura 6.1: Perdas por histerese da amostra 0RD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

As curvas das perdas por histerese da amostra 0RD em tração (Figura 6.1(a)) e em compressão (Figura 6.1(b)) foram modeladas utilizando os seis métodos já mencionados. Os valores encontrados para os coeficientes de determinação R^2 de cada curva são apresentados nas tabelas 6.2 e 6.3. Na Tabela 6.2 são mostrados os valores encontrados de R^2 para os métodos nos diferentes níveis de esforços de tração aplicados (e em 0 MPa). Em tração, o modelo 6 apresentou os maiores valores de R^2 em todos os níveis de tensões mecânicas. Nos níveis 15 MPa e 20 MPa, o método 4 também apresentou uma boa aproximação, pois nesses casos, os valores de R^2 foram próximos aos obtidos pelo método 6 (os valores foram até iguais em 15 MPa de tração). Na Tabela 6.3 são apresentados os resultados de R^2 das curvas dos

modelos para 0 MPa e para os níveis de compressão aplicado. Nesta tabela, pode-se observar que à medida que se aumentaram os níveis de esforços mecânicos, maiores foram as diferenças entre os valores de R^2 do modelo 6 e dos demais. Quando aplicados 20 MPa de compressão, a solução encontrada para os modelos 2, 3 e 4 forneceram valores nulos para alguns de seus parâmetros, com exceção de K_h e α_0 . Este fato levou a soluções exatamente iguais às encontradas para o método 1 e, por isso, os valores de R^2 correspondentes a esses níveis de carregamento não foram colocados na Tabela 6.3.

Tabela 6.2. Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra ORD.

Modelo	R^2				
	0 MPa	T5 MPa	T10 MPa	T15 MPa	T20MPa
1	0,99701	0,99586	0,99570	0,99706	0,99746
2	0,99928	0,99911	0,99920	0,99956	0,99966
3	0,99962	0,99959	0,99937	0,99973	0,99969
4	0,99970	0,99978	0,99975	0,99991	0,99990
5	0,99781	0,99662	0,99635	0,99766	0,99800
6	0,99976	0,99981	0,99978	0,99991	0,99991

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 6.3: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra ORD.

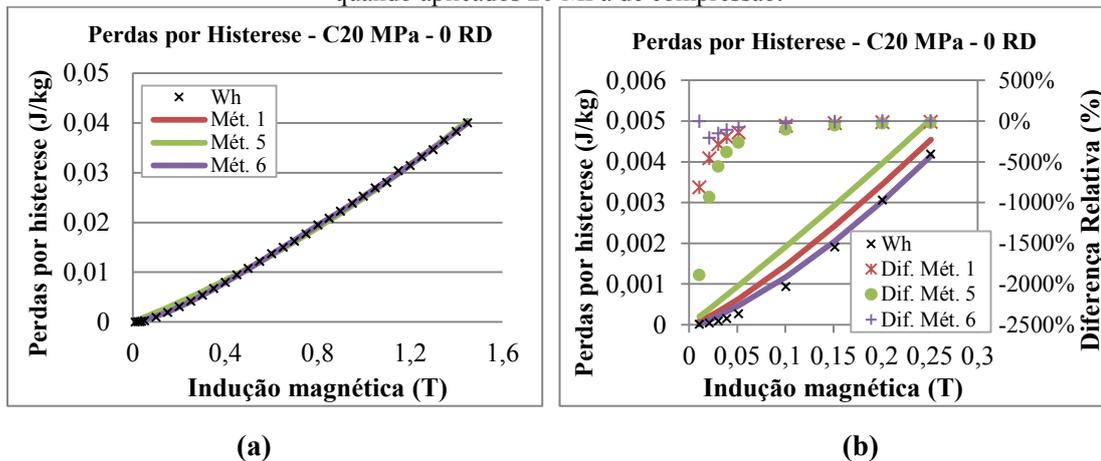
Modelo	R^2				
	0 MPa	C5 MPa	C10 MPa	C15 MPa	C20MPa
1	0,99701	0,99758	0,99937	0,99914	0,99960
2	0,99928	0,99943	0,99945	0,99934	-
3	0,99962	0,99973	0,99953	0,99940	-
4	0,99970	0,99984	0,99961	0,99939	-
5	0,99781	0,99759	0,99887	0,99866	0,99834
6	0,99976	0,99989	0,99994	0,99987	0,99985

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A fim de ilustrar um dos casos de comparação dos modelos para esta amostra, são apresentadas na Figura 6.2(a) a curva experimental de perdas a 1 Hz e as curvas dos modelos 1 (curva na cor vermelha), 5 (curva na cor verde) e 6 (curva na cor roxa) em 20 MPa de compressão para a indução magnética até 1,5 T, e na Figura 6.2(b) em detalhe até 0,25 T para observar, as mesmas curvas da Figura 6.2(a), nos baixos valores de indução magnética. Na Figura 6.2(b) também são apresentados os valores de diferenças relativas entre os valores de perdas dos modelos e dos valores experimentais. Na Figura 6.2(a), nota-se que as perdas experimentais aparentam ser bem representadas pelos três modelos, pois as curvas praticamente se sobrepõem. Entretanto, como mencionado anteriormente, as diferenças mais

significativas se deram em níveis baixos de indução magnética (vide a Figura 6.2(b)). Comprovando o valor de R^2 superior aos demais modelos, como apresentado na Tabela 6.3, nota-se que, de fato, o método 6 representou melhor as perdas experimentais em 20 MPa de compressão (apresentou menores diferenças relativas percentuais representadas pela cruz na cor roxa). O método 5 apresentou diferenças relativas que chegaram a 2000% (círculos na cor verde).

Figura 6.2: Comparação de resultados de perdas por histerese obtidos pelos métodos 1, 5 e 6 para amostra 0RD quando aplicados 20 MPa de compressão.



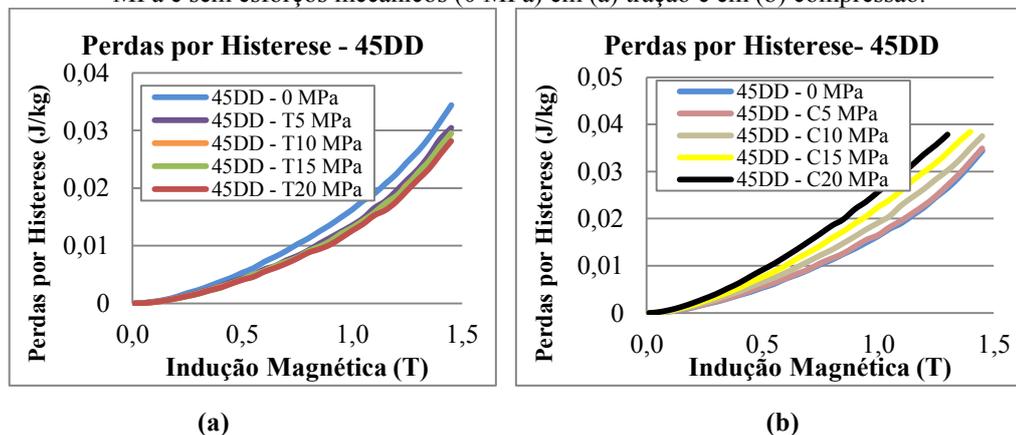
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Comparações semelhantes às realizadas nas tabelas 6.2 e 6.3 para as amostras com direções de corte de 45° e 90° são apresentadas nas próximas seções.

6.1.2. Representação das perdas por histerese para amostra 45DD

As curvas de perdas por histerese experimentais da amostra 45DD são apresentadas na Figura 6.3(a) para o caso sem aplicação de esforços e para os níveis de tração aplicados. Na Figura 6.3(b), são mostradas as curvas sem aplicação de esforços e para os níveis de compressão aplicados.

Figura 6.3: Perdas por histerese da amostra 45DD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Tabela 6.4 são apresentados os valores de R^2 relativos aos modelos de perdas por histerese para os ensaios sem esforço mecânico e para os níveis de tração de 5 MPa a 20 MPa na amostra 45DD. Observa-se que, com exceção do caso em 10 MPa de tração, o método 6 é o que melhor representa os valores experimentais. Entretanto, no caso específico de 10 MPa, o maior valor do coeficiente de determinação foi obtido com o modelo 4.

Na Tabela 6.5, tem-se os valores de R^2 para o caso sem esforço e para compressões nos níveis de 5 MPa a 20 MPa nesta amostra. Os modelos que melhor descreveram o comportamento das perdas por histerese sob efeitos de compressão da amostra 45DD variaram. Nos níveis de compressão de 5 MPa e 20 MPa, o modelo 6 forneceu maiores valores de coeficiente de determinação. Nota-se que, nesse último caso, a diferença entre os valores de R^2 dos modelos 1 e 6 foi pequena (0,006%). Nos níveis de 10 MPa e 15 MPa, o método 4 apresentou os maiores valores de R^2 . Em 15 MPa, o valor do coeficiente de determinação do modelo 3 é igual ao do método 4. Os valores de R^2 foram próximos quando comparados os diferentes modelos para um mesmo valor de esforço, mesmo para os níveis de 15 MPa e 20 MPa de compressão (quando a curva apresenta modificações mais significativas na sua forma – vide curvas nas cores preta e amarela da Figura 6.3(b)).

Tabela 6.4: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra 45DD.

Modelo	R^2				
	0 MPa	T5 MPa	T10 MPa	T15 MPa	T20MPa
1	0,99741	0,99655	0,99548	0,99665	0,99607
2	0,99946	0,99955	0,99932	0,99948	0,99933
3	0,99978	0,99978	0,99962	0,99969	0,99937
4	0,99991	0,99979	0,99983	0,99985	0,99980
5	0,99819	0,99697	0,99591	0,99703	0,99659
6	0,99996	0,99983	0,99978	0,99991	0,99991

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 6.5: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra 45DD.

Modelo	R^2				
	0 MPa	C5 MPa	C10 MPa	C15 MPa	C20MPa
1	0,99741	0,99744	0,99928	0,99991	0,99990
2	0,99946	0,99946	0,99983	0,99994	-
3	0,99978	0,99976	0,99989	0,99995	-
4	0,99991	0,99989	0,99991	0,99995	-
5	0,99819	0,99756	0,99964	0,99955	0,99891
6	0,99996	0,99993	0,99986	0,99992	0,99996

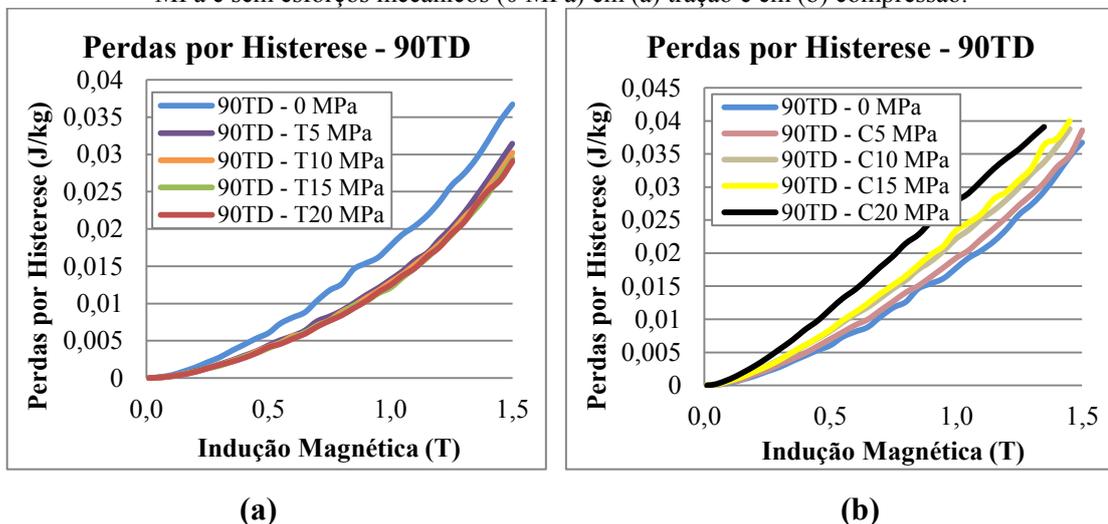
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Serão apresentados, na próxima seção, os resultados encontrados para as amostras com direção de laminação transversal (90°).

6.1.3. Representação das perdas por histerese para amostra 90TD

As curvas das perdas por histerese experimentais da amostra 90TD são apresentadas na Figura 6.4(a), para o caso sem aplicação de esforços e para os níveis de tração aplicados, e na Figura 6.4 (b), para o caso sem aplicação de esforços e para os níveis de compressão aplicados. Os comportamentos de perdas por histerese apresentados nestas figuras foram semelhantes às das duas outras amostras (Figura 6.1 e Figura 6.3).

Figura 6.4: Perdas por histerese da amostra 90TD quando aplicados os níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa e sem esforços mecânicos (0 MPa) em (a) tração e em (b) compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Tabela 6.6 são apresentados os valores de R^2 dos modelos de perdas por histerese da amostra 90 TD para o caso sem esforço e de tração de 5 MPa a 20 MPa. Como se pode observar na Tabela 6.6, foram obtidos os maiores valores de R^2 (em negrito) para todos os níveis de tensões aplicadas com o método 6. Quando aplicados 10 MPa de tração, os modelos 4 e 6 apresentaram o mesmo valor de R^2 .

Na Tabela 6.7, tem-se os valores calculados de R^2 para cada modelo nos níveis de compressão aplicados nesta amostra. Assim como em tração, os valores dos coeficientes de determinação foram maiores utilizando o modelo 6. O método 6 apresentou valores de R^2 relativamente superiores aos dos outros métodos. A diferença em 20 MPa de compressão entre os modelos 1 e 6, por exemplo, foi de 0,22%.

Tabela 6.6: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de tração aplicados na amostra 90TD.

Modelo	R^2				
	0 MPa	T5 MPa	T10 MPa	T15 MPa	T20MPa
1	0,99786	0,99570	0,99676	0,99657	0,99755
2	0,99909	0,99933	0,99960	0,99955	0,99969
3	0,99937	0,99974	0,99977	0,99982	0,99977
4	0,99942	0,99982	0,99991	0,99985	0,99976
5	0,99854	0,99626	0,99729	0,99712	0,99802
6	0,99964	0,99988	0,99991	0,99990	0,99978

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 6.7: Comparações dos valores de aproximação R^2 dos métodos de perdas por histerese para os níveis de esforços de compressão aplicados na amostra 90TD.

Modelo	R^2				
	0 MPa	C5 MPa	C10 MPa	C15 MPa	C20MPa
1	0,99786	0,99869	0,99947	0,99929	0,99875
2	0,99909	0,99932	0,99960	0,99939	-
3	0,99937	0,99850	0,99968	0,99942	-
4	0,99942	0,99962	0,99973	0,99944	-
5	0,99854	0,99951	0,99917	0,99875	0,99674
6	0,99964	0,99977	0,99985	0,99956	0,99991

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Os níveis de esforços mecânicos modificam consideravelmente os níveis de perdas por histerese, e também o formato das curvas, principalmente nos casos de compressão. Com as análises de comparação dos modelos empregando o coeficiente de determinação, percebe-se que, com exceção de alguns casos, os métodos 4 e 6 possuem as melhores capacidades de representação. Quantitativamente, os maiores valores de R^2 foram obtidos na aplicação do modelo 6 (método polinomial de 6ª ordem).

Na próxima seção, serão apresentados os resultados dos valores dos coeficientes de perdas por histerese dos modelos comparados em função dos níveis de esforços.

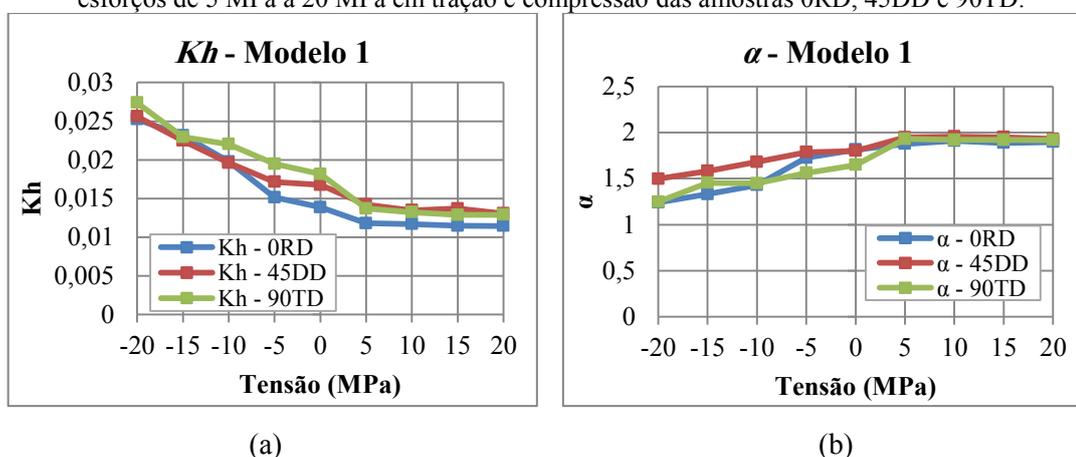
6.1.4. Comportamento dos valores dos parâmetros dos modelos de perdas por histerese

Nesta seção, serão apresentadas comparações dos valores dos parâmetros dos seis modelos de representação de perdas por histerese em função dos níveis de tração e de compressão aplicados para as três amostras estampadas em 0°, 45° e 90°.

6.1.4.1. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 1

O modelo 1 é uma curva de potência ($W_h = K_h B_p^\alpha$), proposta por Steinmetz (STEINMETZ, 1892b). Na Figura 6.5 são apresentadas as curvas de valores dos coeficientes deste modelo em função da tensão mecânica, onde Figura 6.5(a) contém as variações de K_h e a Figura 6.5(b) as variações de α . Os coeficientes K_h (Figura 6.5(a)) sofrem aumentos significativos quando aplicados esforços de compressão (em relação a 0 MPa) e diminuições em 5 MPa de tração. Os valores de K_h se mantêm praticamente constantes nos níveis de 5 MPa a 20 MPa de tração. Observa-se que os comportamentos dos valores de K_h deste modelo são similares ao comportamento de K_{hyst} , para os valores até 20 MPa de compressão, obtidos por Saeed (SAEED, 2015) e apresentados na Figura 3.8(a) da seção 3.3. Nos valores dos expoentes α (Figura 6.5(b)), notam-se diminuições significativas dos valores quando aplicados esforços de compressão (em comparação com 0 MPa) e aumentos dos valores em 5 MPa de tração. Os valores de α também se mantêm praticamente constantes nos níveis de 5 MPa a 20 MPa de tração. O comportamento das variações dos parâmetros deste modelo foi similar nas três amostras com direções de corte de 0° , 45° e 90° .

Figura 6.5: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h e (b) α , obtidos pelo modelo 1, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão das amostras 0RD, 45DD e 90TD.



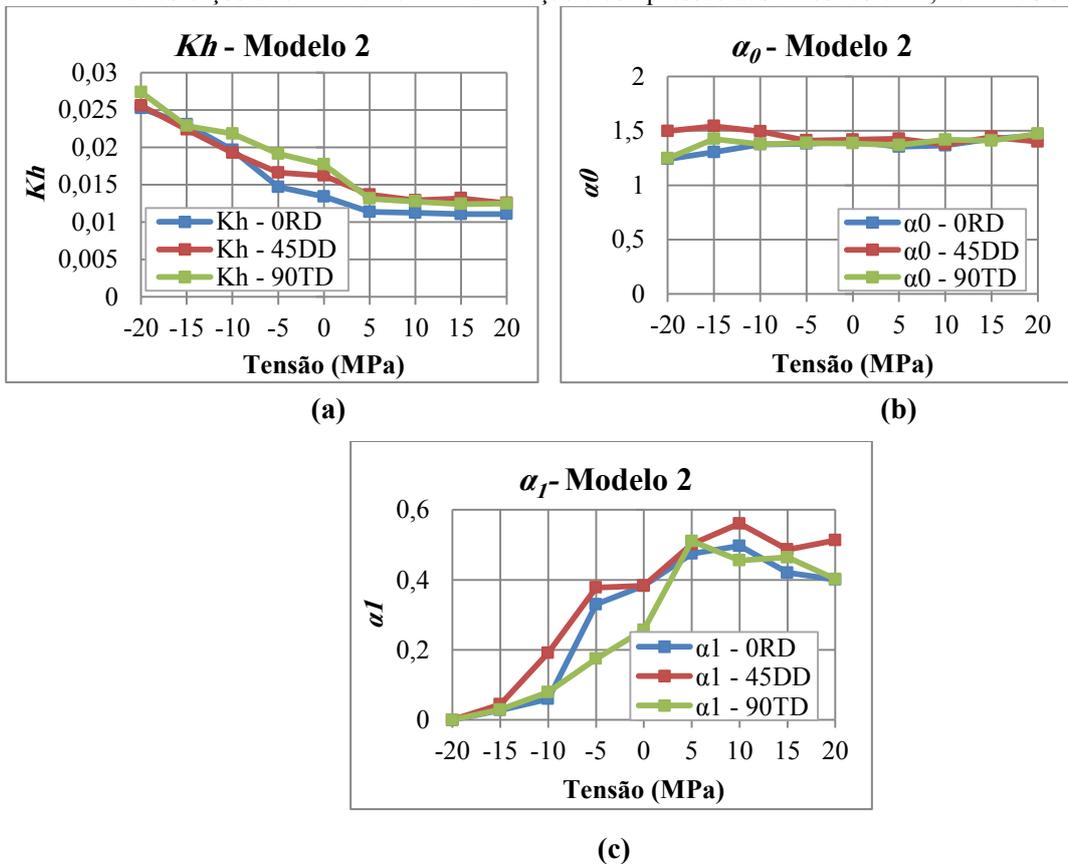
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

6.1.4.2. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 2

O modelo 2 ($W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p}$) é uma modificação do modelo 1. Nas seguintes figuras são apresentadas as variações dos valores dos parâmetros do modelo 2 nos níveis aplicados de tração e de compressão. Na Figura 6.6(a), representa-se a variação de K_h , na Figura 6.6(b), representa-se a variação de α_0 e, na Figura 6.6(c), representa-se a variação de α_1 . Os valores de K_h encontrados no modelo 1 (Figura 6.5(a)) e no modelo 2 (Figura 6.6(a)) tiveram comportamentos semelhantes, com valores próximos também. A diferença entre os

valores dos coeficientes K_h encontrados pelos modelos 1 e 2 não superou 4%. Os valores de α_0 não variaram significativamente na maioria dos esforços aplicados (vide Figura 6.6(b)). Na Figura 6.5(c), observa-se que, quando aplicados 20 MPa de compressão, os valores dos coeficientes α_1 foram nulos para as três amostras. Neste caso de 20 MPa de compressão, os valores dos parâmetros K_h e α_0 obtidos com o modelo 2 foram os mesmos dos obtidos com o modelo 1.

Figura 6.6: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 e (c) α_1 , obtidos pelo modelo 2, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão das amostras 0RD, 45DD e 90TD.



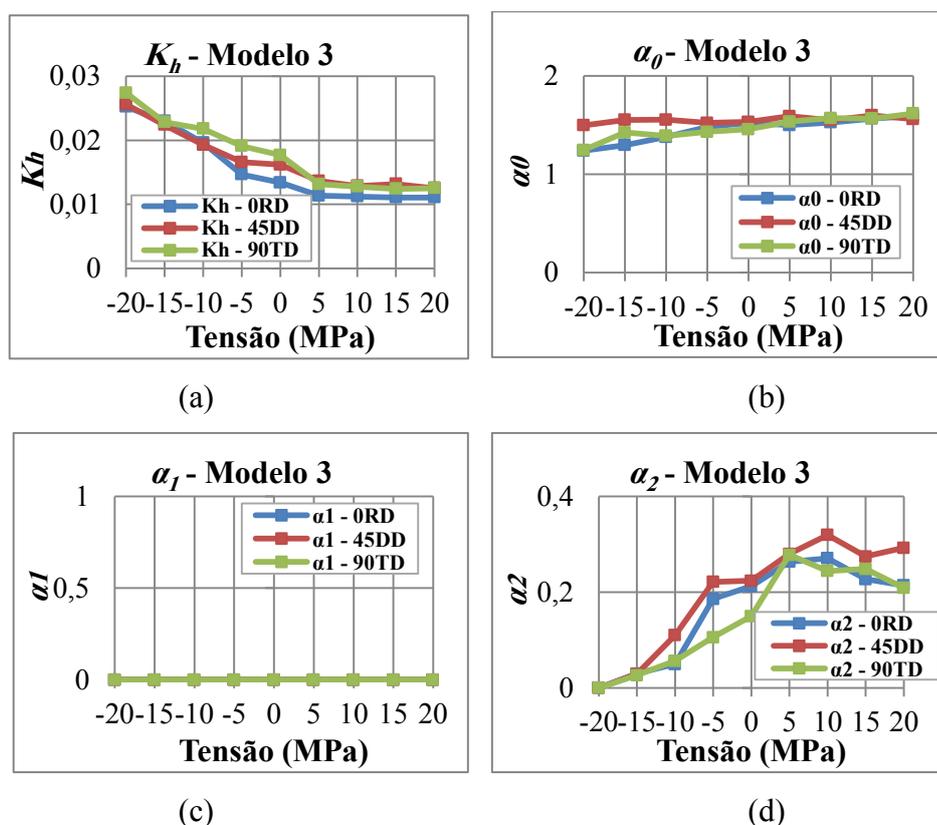
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

6.1.4.3. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 3

O modelo 3 ($W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2}$) também é uma variação do método 1. Na Figura 6.7 são apresentadas as variações dos valores dos quatro parâmetros para representação das perdas por histerese das três amostras. Nesta figura, os gráficos (a), (b), (c) e (d) apresentam as curvas dos valores encontrados para K_h , α_0 , α_1 e α_2 , respectivamente. Os comportamentos de K_h ao longo dos níveis de esforços mecânicos (Figura 6.7(a)) foram semelhantes aos comportamentos de K_h dos modelos 1 (Figura 6.5(a)) e 2 (Figura 6.6(a)). As diferenças relativas entre os coeficientes K_h encontrados pelos modelos 1 e 3 para cada tensão

aplicada não superou 4%. Os comportamentos de α_0 do modelo 3 (Figura 6.6(b)) foram semelhantes aos dos parâmetros α_0 do modelo 2 (Figura 6.6(b)), mas os valores são diferentes. Os comportamentos dos valores dos parâmetros α_2 do modelo 3 (Figura 6.7(d)) e dos valores de α_1 do modelo 2 (Figura 6.6(c)) também são semelhantes. Os valores dos parâmetros α_1 do modelo 3 (Figura 6.7(c)) para as três amostras foram nulos em todos níveis de esforços mecânicos.

Figura 6.7: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 e (d) α_2 , obtidos pelo modelo 3, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.



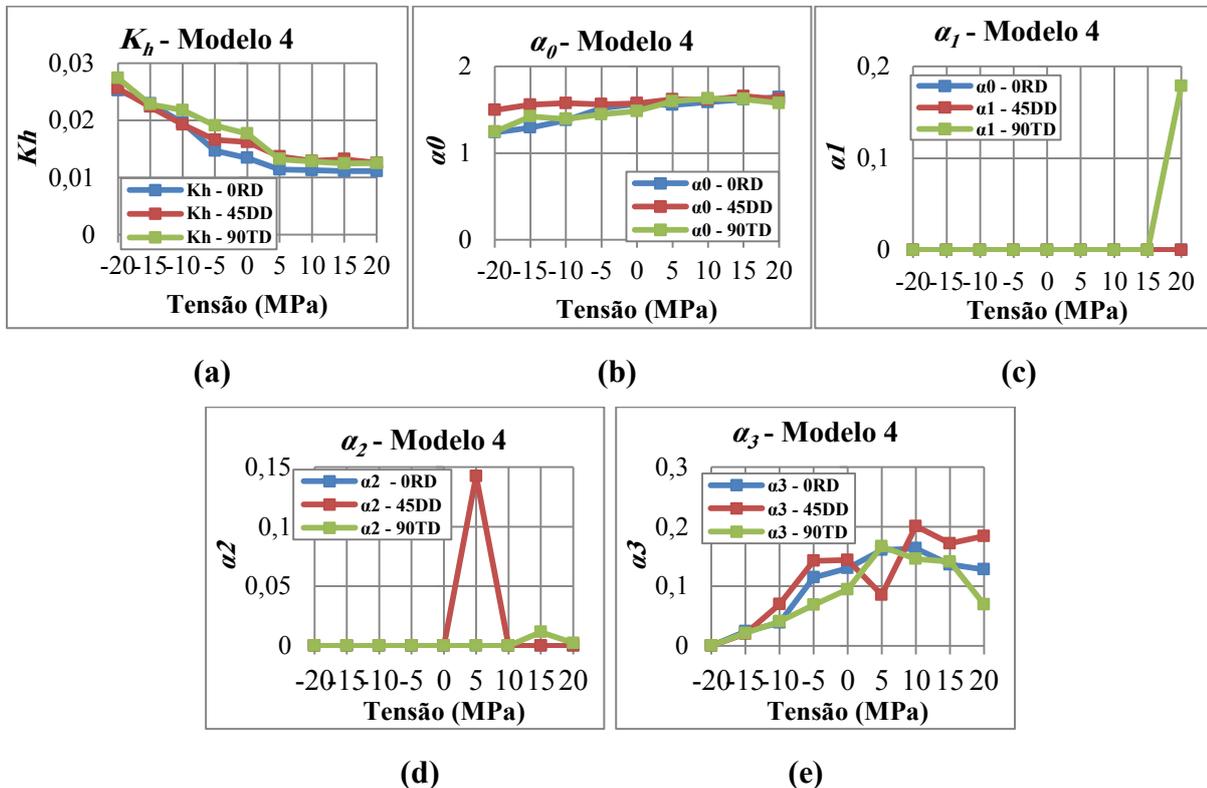
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

6.1.4.4. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 4

O modelo 4 ($W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2 + \alpha_3 B_p^3}$) também é uma variação do modelo 1. Na Figura 6.8 são apresentados os resultados dos valores dos parâmetros do modelo 4. Nesta figura, o gráfico (a) representa os valores de K_h , (b) representa os valores de α_0 , (c) representa os valores de α_1 , (d) representa os valores de α_2 e (e) representa os valores de α_3 . De maneira similar ao que ocorreu nos modelos 2 e 3, os valores de K_h do modelo 4 (Figura 6.8(a)) foram próximos aos de K_h do modelo 1 (Figura 6.5(a)), sendo que as diferenças relativas entre os valores não superaram 4%. Os parâmetros α_1 (Figura 6.8(c)) e α_2 (Figura 6.8(d)) do modelo 4 foram praticamente nulos em todos os níveis de esforços mecânicos aplicados, com exceção

dos casos de 20 MPa da amostra 90 TD para α_1 , de 5MPa (amostra 45DD) em α_2 .e de 20 MPa (amostra 90TD) para α_2 .

Figura 6.8: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 e (d) α_2 , obtidos pelo modelo 4, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras 0RD, 45DD e 90TD.

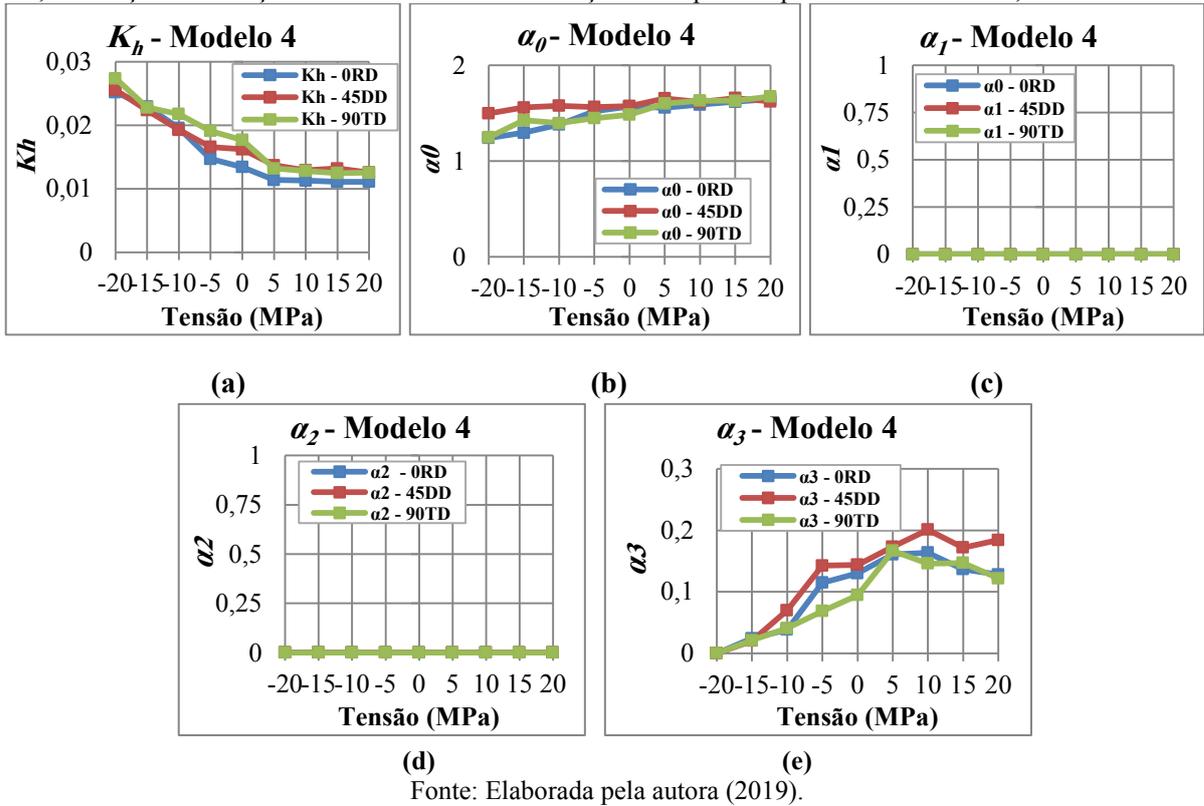


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Sabe-se que o *solver* do Excel fornece apenas uma solução numérica. Notou-se também que os comportamentos diferentes (não nulos) dos parâmetros α_1 e α_2 nos casos de 5 MPa de tração e 20 MPa de tração implicaram nos decréscimos dos parâmetros α_3 nestes mesmo níveis de esforços para as respectivas amostras (45DD e 90 TD) ou vice-versa (diminuições em α_3 podem ter levado aos aumentos dos demais parâmetros).

Decidiu-se manter os coeficientes α_1 e α_2 com valor nulo fixo nos três casos específicos apresentados e, com isso, obtiveram-se novos valores dos coeficientes, que são apresentados na Figura 6.9. Depois de realizadas as modificações, obteve-se um padrão mais semelhante entre os valores dos parâmetros das três amostras para todos os parâmetros deste modelo.

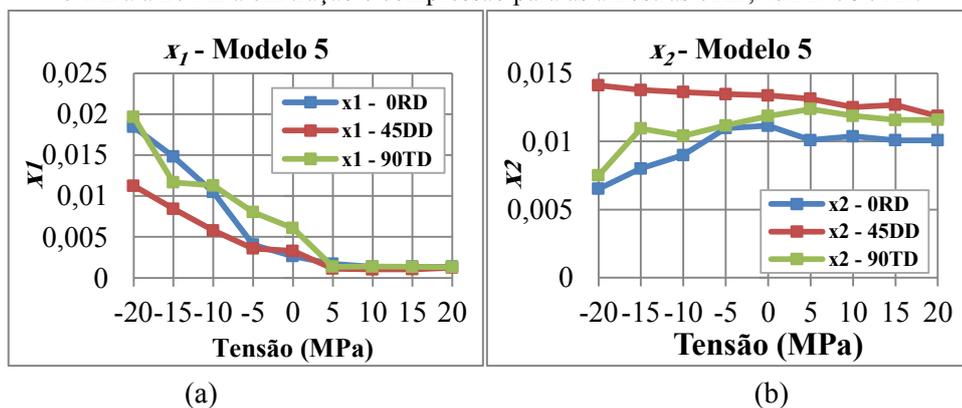
Figura 6.9: Comportamento dos valores dos parâmetros (a) K_h , (b) α_0 , (c) α_1 , (d) α_2 e (e) α_3 obtidos pelo modelo 4, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.



6.1.4.5. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 5

O modelo 5 é definido por um polinômio de segunda ordem sem o termo independente ($W_h = x_1 B_p + x_2 B_p^2$). As curvas de variação dos valores dos coeficientes x_1 e x_2 para todos os níveis de esforços aplicados são apresentados na Figura 6.10, onde o gráfico (a) mostra os valores encontrados para o coeficiente x_1 e (b) x_2 . Neste método, os valores de ambos os coeficientes foram mais semelhantes entre si para as três amostras quando aplicados esforços de tração, o que não ocorre em compressão.

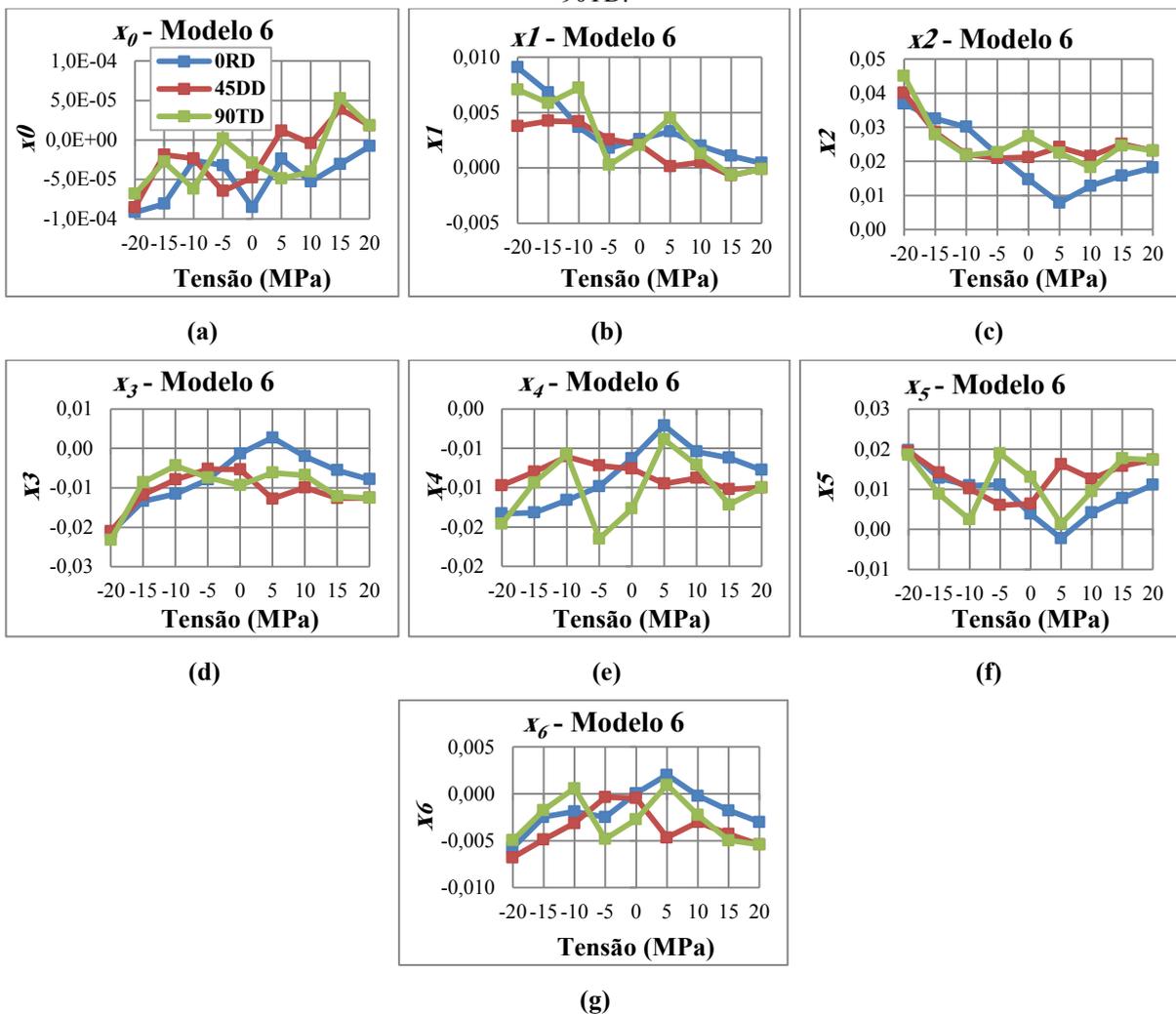
Figura 6.10: Comportamento dos coeficientes (a) x_1 e (b) x_2 , obtidos com o modelo 5, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras ORD, 45DD e 90TD.



6.1.4.6. Comportamento dos valores dos parâmetros do modelo 6

O modelo 6 aproxima as perdas por histerese através de um polinômio de sexta ordem ($W_h = x_0 + x_1 B_p + x_2 B_p^2 + x_3 B_p^3 + x_4 B_p^4 + x_5 B_p^5 + x_6 B_p^6$). Neste modelo, são determinados sete coeficientes: x_0 , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , e x_6 . Na Figura 6.11 são mostradas as curvas de variação dos valores dos coeficientes de x_0 a x_6 , onde os gráficos são nomeados de (a) até (g), respectivamente. Embora este método leve em conta o coeficiente independente do polinômio x_0 (Figura 6.11(a)), os valores encontrados foram na ordem de 100 vezes menores que os demais. Pode-se inferir da Figura 6.11 que, diferente dos demais métodos, os valores encontrados para os coeficientes do método polinomial de sexta ordem não apresentaram tanta similaridade para as amostras analisadas. Além disso, nenhum destes coeficientes mostrou um padrão bem definido em seu comportamento.

Figura 6.11: Comportamento dos coeficientes, (a) x_0 (b) x_1 , (c) x_2 , (d) x_3 , (e) x_4 , (f) x_5 e (g) x_6 , obtidos com o modelo 6, em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para as amostras 0RD, 45DD e 90TD.

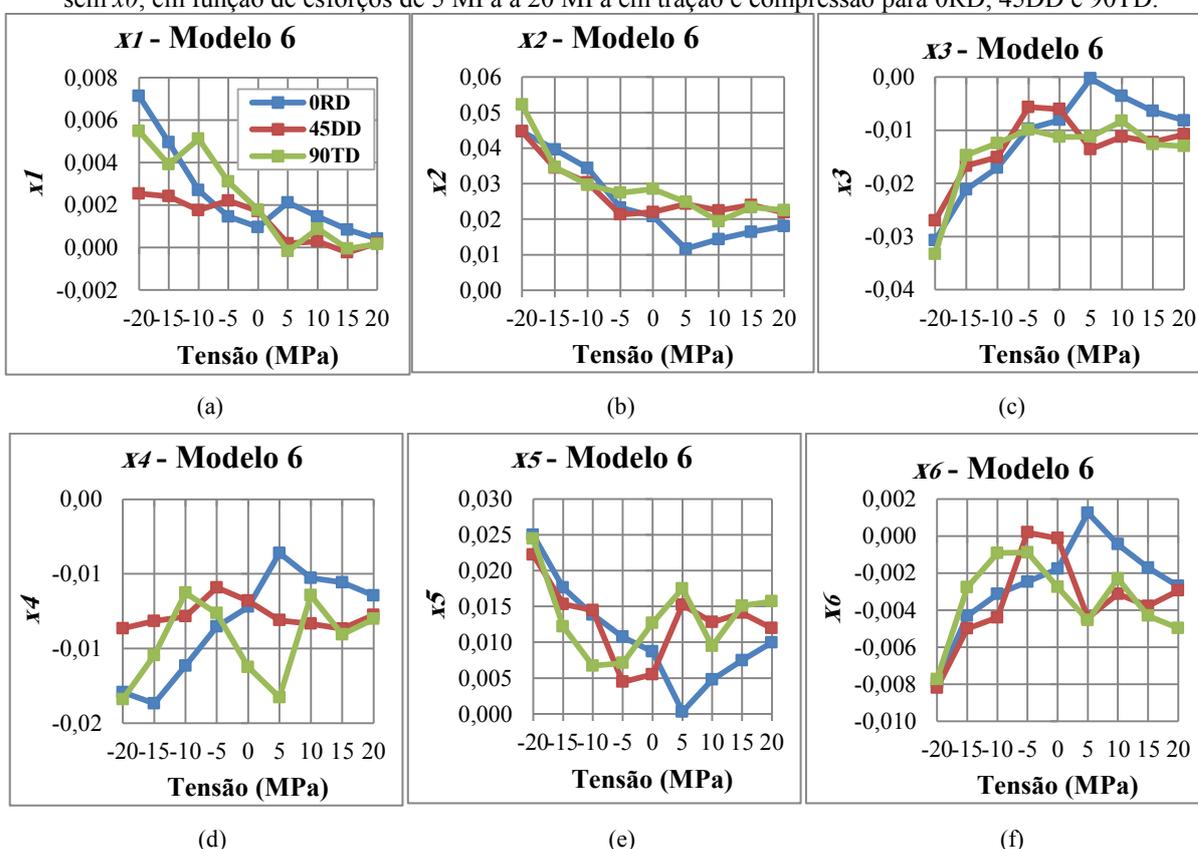


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Considerando que se deseja, preferencialmente, um modelo que tenha um comportamento predefinido da variação dos valores dos parâmetros a fim de ser aplicado em programas de cálculo de campos por elementos finitos em simulações de máquinas elétricas, foi investigado o comportamento do modelo 6 sem o coeficiente x_0 . Na Figura 6.12 são apresentadas as curvas da variação dos valores dos coeficientes do modelo 6 sem o termo independente x_0 . Observa-se nesta figura, que os comportamentos dos valores dos coeficientes das três amostras ensaiadas tiveram um padrão mais definido, principalmente para os coeficientes x_1 , x_2 e x_3 . Entretanto, apesar desta melhora, nota-se que não se obteve um comportamento tão homogêneo como desejado e obtido em outros modelos investigados.

Portanto, há um conflito de interesses ao se utilizar o modelo polinomial de sexta ordem para representar as perdas por histerese, uma vez que este modelo proporciona uma boa representação dos dados experimentais, mas não apresenta um comportamento tão homogêneo da evolução dos valores dos parâmetros em função do carregamento aplicado. Assim, entende-se que para aplicações em simulações onde se realizam cálculos de campos através de elementos finitos, o modelo 6 não é o mais indicado. Dentre os modelos analisados, o método mais indicado para representação das perdas por histerese foi, portanto, o modelo 4.

Figura 6.12: Comportamento dos coeficientes (a) x_1 , (b) x_2 , (c) x_3 , (d) x_4 , (e) x_5 e (f) x_6 , obtidos com o modelo 6 sem x_0 , em função de esforços de 5 MPa a 20 MPa em tração e compressão para 0RD, 45DD e 90TD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

No APÊNDICE D deste trabalho, tem-se um estudo preliminar do equacionamento das perdas por histerese a partir dos valores obtidos e apresentados nesta seção. Apresentados os comportamentos dos valores dos parâmetros dos seis modelos de perdas magnéticas das perdas por histerese em função dos esforços mecânicos aplicados, passa-se a análise do comportamento das perdas dinâmicas.

6.2. COMPORTAMENTO DAS PERDAS DINÂMICAS

Nesta seção serão apresentados resultados encontrados para a representação das perdas dinâmicas. Para isso, foram realizados os procedimentos descritos no item 4.3.1. O primeiro passo consistiu em se obter os valores das perdas experimentais a 100 Hz (perdas totais) e a 1 Hz (perdas por histerese). Em seguida, foram escolhidos os modelos para representação de cada tipo de perda. Na Tabela 6.8 são apresentados de maneira sintetizada os modelos utilizados.

Tabela 6.8: Relação entre tipo de perdas e metodologia de cálculo utilizada nas separações de perdas.

Tipo de perda	Nomenclatura	Modelo
Perdas totais	W_{tot}	$W_{tot} = K_{tot}B_p^\gamma$
	$W_{tot-soma}$	$W_{tot-soma} = W_h + W_{din}$
Perdas por histerese	W_h	$W_h = x_0 + x_1B_p + x_2B_p^2 + x_3B_p^3 + x_4B_p^4 + x_5B_p^5 + x_6B_p^6$
Perdas dinâmicas	W_{din}	$W_{din} = K_{din}B_p^\theta$
	$W_{din-soma}$	$W_{din-soma} = W_{cláss} + W_{exc}$
Perdas clássicas	$W_{cláss}$	$W_{cláss} = K_{cláss}B_p^2$
Perdas excedentes	W_{exc}	$W_{exc} = K_{exc}B_p^{1,5}$

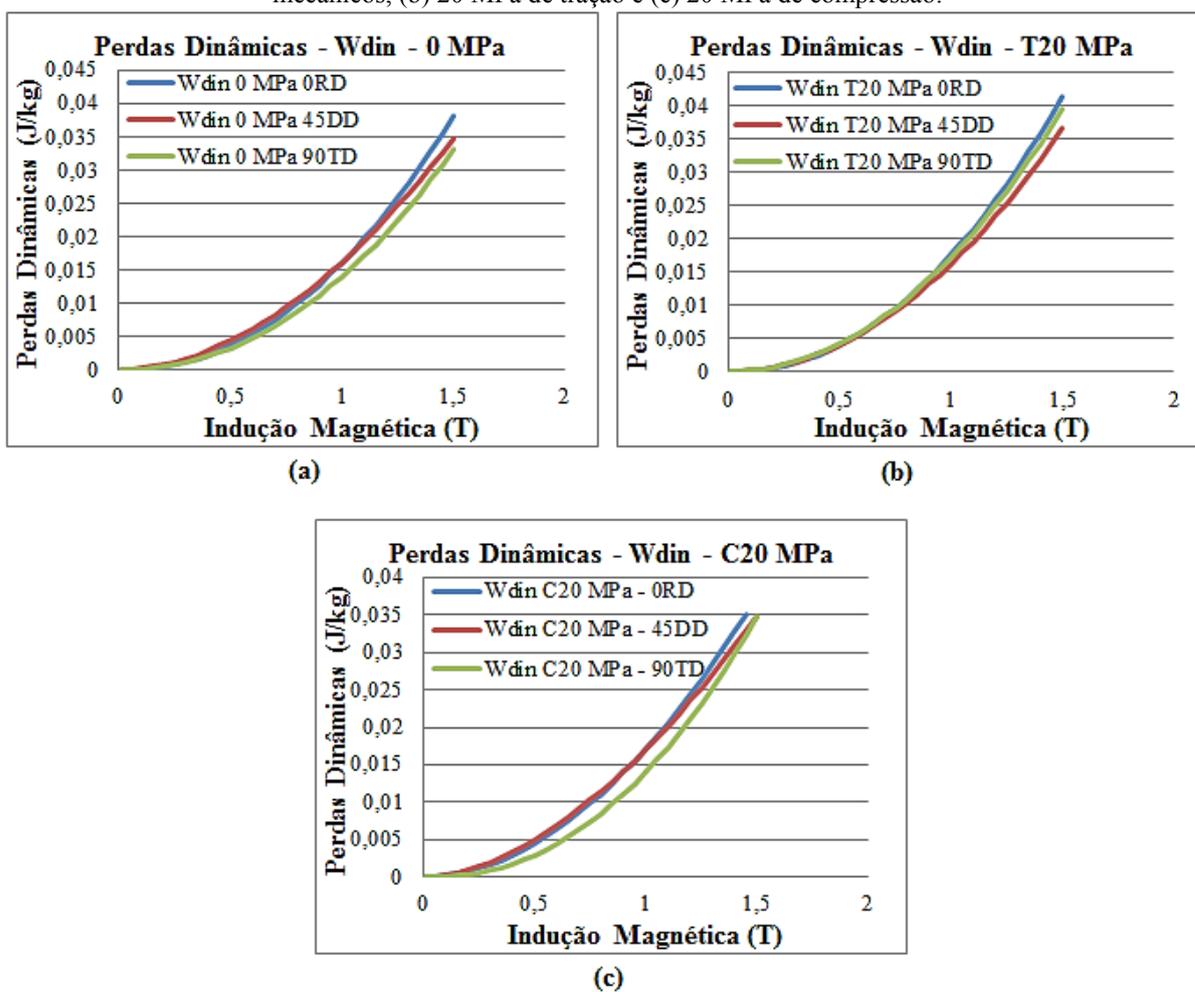
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Para o cálculo das perdas por histerese, o modelo escolhido para as representar foi o polinomial de sexta ordem, devido a sua melhor representatividade das curvas de perdas.

Um primeiro procedimento de separação de perdas realizado foi a decomposição das perdas totais nas componentes de perdas por histerese e perdas dinâmicas. Na Figura 6.13 são apresentadas as curvas obtidas a partir do modelo das perdas dinâmicas W_{din} para os casos de (a) 0 MPa, (b) 20 MPa de tração (T20 MPa) e (c) 20 MPa de compressão (C20 MPa). Observa-se que os valores de perdas dinâmicas obtidas através do modelo W_{din} para as três amostras são semelhantes quando comparados nos mesmos esforços mecânicos. A fim de aprofundar uma análise deste comportamento, são apresentados nas figuras 6.14 e 6.15 as variações dos valores dos parâmetros K_{din} e θ de representação de perdas dinâmicas em

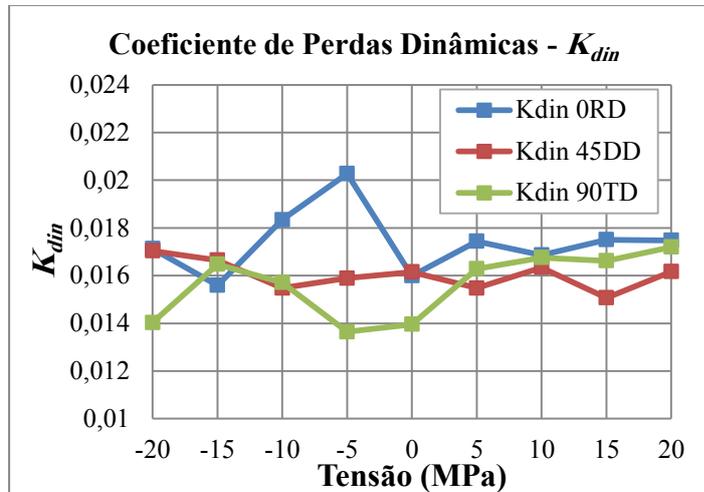
função dos níveis de tensões aplicados. Nota-se que os valores obtidos de K_{din} e θ foram próximos para os níveis de esforços mecânicos aplicados. As maiores diferenças ocorrem quando aplicados esforços de compressão. Este comportamento é esperado parcialmente, pois se considera que as perdas clássicas não são alteradas por efeitos de esforços mecânicos.

Figura 6.13: Perdas dinâmicas calculadas através do modelo W_{din} para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.



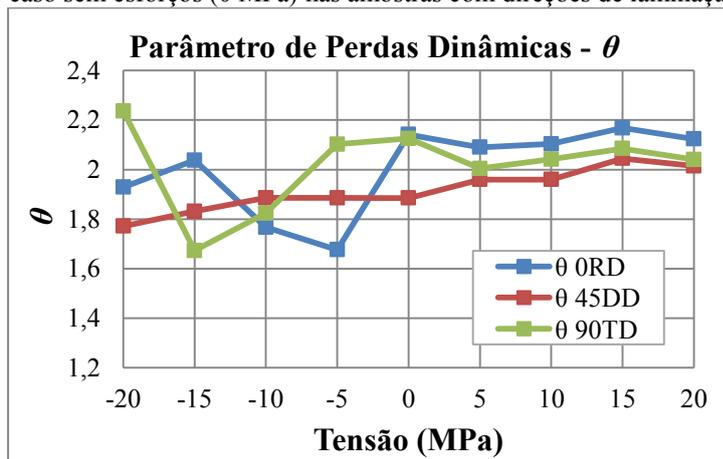
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 6.14: Valores dos coeficientes do modelo de perdas dinâmicas K_{din} para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90°.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 6.15: Valores do expoente do modelo de perdas dinâmicas θ para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90°.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Outro procedimento de separação das perdas totais em perdas por histerese, perdas clássicas e perdas excedentes foi realizado, onde a soma das clássicas e excedentes foi condicionada ao valor de perdas dinâmicas neste último procedimento realizado. A determinação do valor dos parâmetros das perdas totais e das perdas por histerese foi realizada novamente. Este procedimento será apresentado na próxima seção.

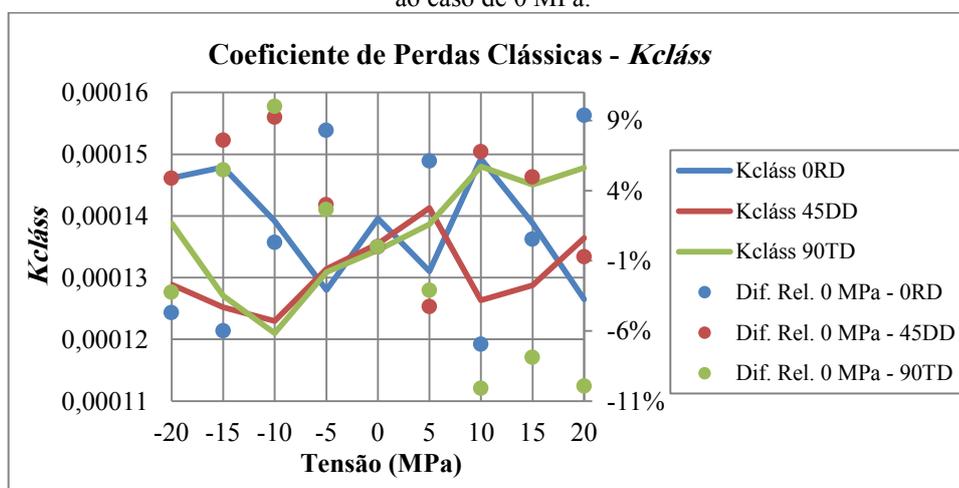
6.2.1. Estudo do comportamento das perdas clássicas

As perdas clássicas $W_{cláss}$, também conhecidas por perdas por correntes induzidas de Foucault ou apenas perdas de Foucault, são uma parcela das perdas dinâmicas do material. Como apresentado na Tabela 6.8, neste trabalho é utilizada uma metodologia na qual as perdas dependem da indução magnética de pico B_p ao quadrado e multiplicada por uma

constante ($K_{cláss}$) e pela frequência de ensaio f_0 . Então, para determinar a representação dessas perdas, foi necessário obter-se apenas o valor do coeficiente $K_{cláss}$. Foi também empregada a consideração de que as perdas clássicas não sofrem uma variação significativa em função de carregamentos mecânicos. Para confirmar essa hipótese, foi realizada a separação de perdas deixando o coeficiente $K_{cláss}$ livre a fim de identificar os valores desse coeficiente em todos os casos de carregamentos mecânicos. Portanto, nesta análise, todos os parâmetros do modelo das parcelas de perdas devem ser determinados.

Realizadas as separações para os níveis de esforços aplicados na amostra, foram encontrados os valores do coeficiente $K_{cláss}$. Na Figura 6.16, são apresentados os valores obtidos deste coeficiente e a diferença relativa percentual ao valor obtido para o caso sem aplicação de esforços mecânicos (0 MPa) para os três tipos de amostras analisadas. Os valores de $K_{cláss}$ obtidos através desta metodologia de separação de perdas apresentaram valores aproximadamente constantes para as três amostras com direções de laminações de 0° , 45° e 90° . A Figura 6.16 apresenta os valores resultantes em função dos esforços entre -20 MPa e 20 MPa. As diferenças relativas percentuais para a amostra 0RD entre os casos com esforços mecânicos e sem esforço desta mesma amostra foi representada através do círculo de cor azul, da amostra 45DD pela cor vermelha e do círculo verde para a amostra 90TD. Tais resultados não superaram 11%. Assim, pode-se considerar que as perdas clássicas não sofrem uma variação considerável quando aplicados esforços mecânicos no material para os níveis de 5 MPa a 20 MPa de tração e de compressão.

Figura 6.16: Valores dos coeficientes $K_{cláss}$ do modelo de perdas clássicas quando aplicados esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços mecânicos e diferenças relativas percentuais em relação ao caso de 0 MPa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Tabela 6.9 são apresentados os resultados de determinação dos valores dos coeficientes de perdas clássicas para as três amostras em 0 MPa. A diferença relativa ao valor médio dos três coeficientes em valores absolutos foi de 2%. Nas condições de ensaio sem esforços mecânicos, os valores para as três amostras são então muito próximos.

Tabela 6.9: Comparação entre os valores de $K_{cláss}$ encontrados na separação de perdas para as amostras com direções de laminação de 0°, 45° e 90° quando não são aplicados esforços mecânicos (0MPa).

Amostra	$K_{cláss}$	$K_{cláss\ médio}$	Dif. Rel. $K_{cláss\ médio}$ (%)
ORD	0,0001396	0,0001365	2%
45DD	0,0001355		1%
90TD	0,0001345		1%

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

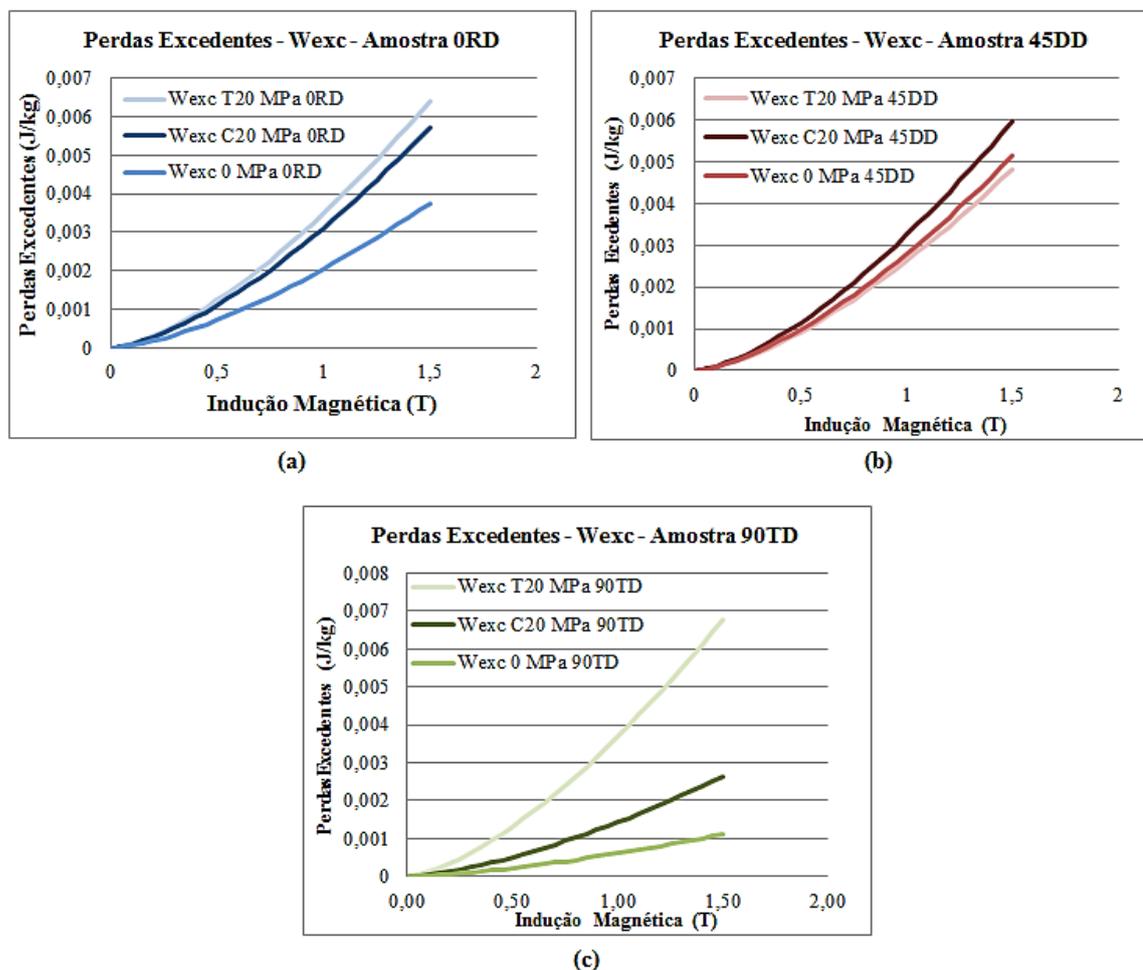
Aplicou-se outro procedimento de separação das perdas histerese, excedentes e clássicas, onde se mantém os valores fixos dos coeficientes de perdas clássicas para cada amostra. Isto proporciona a investigação do comportamento das perdas excedentes a ser tratada na próxima seção.

6.2.2. Estudo do comportamento das perdas excedentes

Para análise do comportamento das perdas excedentes neste material (três direções de laminação diferentes), quando submetidos a esforços de tração e compressão, foi considerado que as perdas excedentes são descritas pelo modelo $W_{exc} = K_{exc} B^{1,5} f_0^{0,5}$.

São apresentados na Figura 6.17 as curvas das perdas excedentes para amostras com direção de laminação (a) longitudinal, (b) diagonal e (c) transversal, para os casos de ensaios sem aplicações de esforços (0 MPa) e nos casos extremos de aplicações de 20 MPa de tração e compressão (T20 MPa e C20 MPa, respectivamente). Em uma análise mais geral, as perdas excedentes não obedeceram a um padrão quando aplicados esforços de tração ou de compressão em nenhuma das três amostras. Por exemplo, para a amostra ORD, as maiores perdas excedentes ocorreram em tração e, para a amostra 45DD, ocorreram em compressão. Nota-se que os valores de perdas excedentes variam de acordo com o tipo de esforço aplicado e a direção de corte, caracterizando também certa anisotropia.

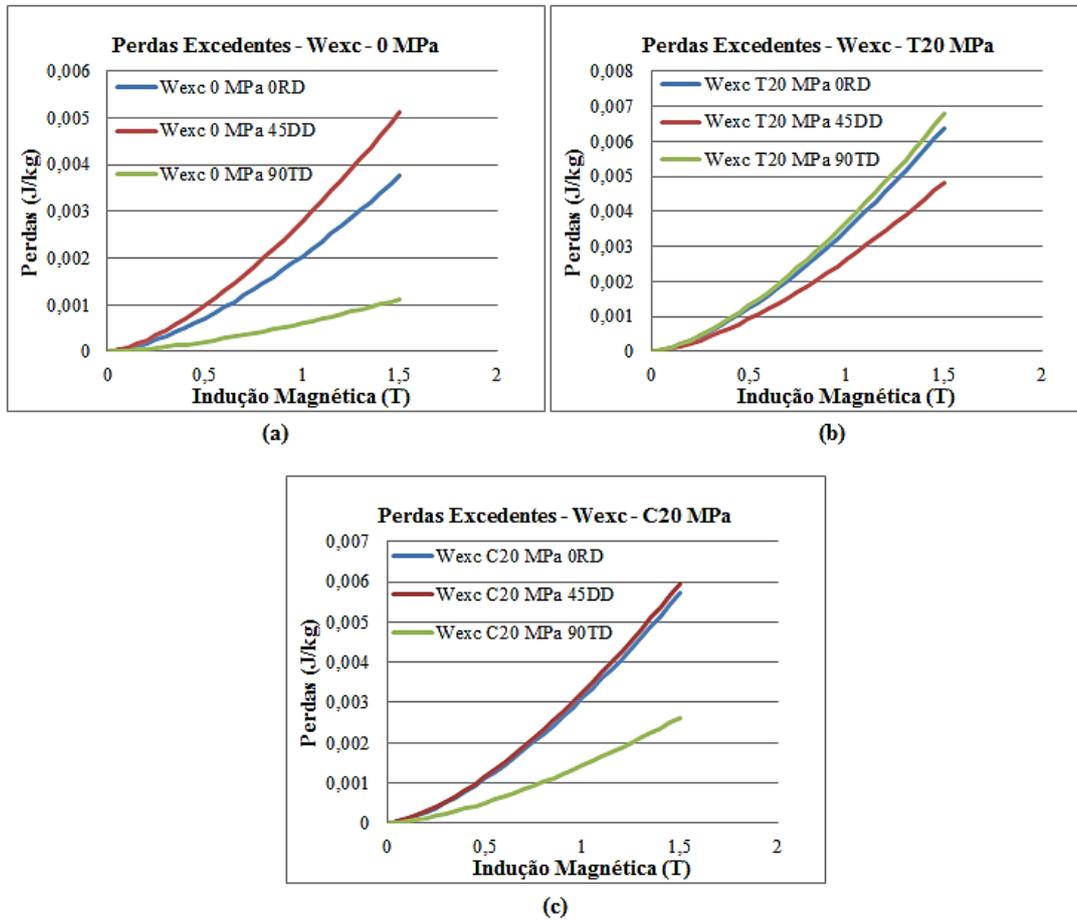
Figura 6.17: Comparação entre os valores de perdas excedentes para as amostras (a) 0RD, (b) 45DD e (c) 90TD quando aplicados esforços de 20 MPa de tração e compressão e no caso sem aplicação de esforços.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A fim de realizar uma comparação observando a diferença entre as três amostras, foram realizadas comparações em um mesmo nível de esforço mecânico aplicado. Na Figura 6.18 são apresentados os resultados de perdas excedentes para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos (0 MPa), (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão para as três amostras analisadas. Pode-se observar que os valores de perdas excedentes não seguiram um padrão de acordo com o carregamento mecânico aplicado. Na Figura 6.18(a), as curvas de perdas apresentaram valores bem diferentes entre os três tipos de amostras. A amostra com direção de laminação de 45° apresentou os maiores valores de perdas. Na Figura 6.18(b), os valores de perdas excedentes foram muito próximos entre as amostras com direções de laminação de 0° e de 90°. Na Figura 6.18(c), os valores das perdas nas amostras 45DD e 0RD são quase idênticos quando comparadas em relação à amostra 90TD. Estes resultados corroboram que a perda excedente pode possuir um comportamento anisotrópico.

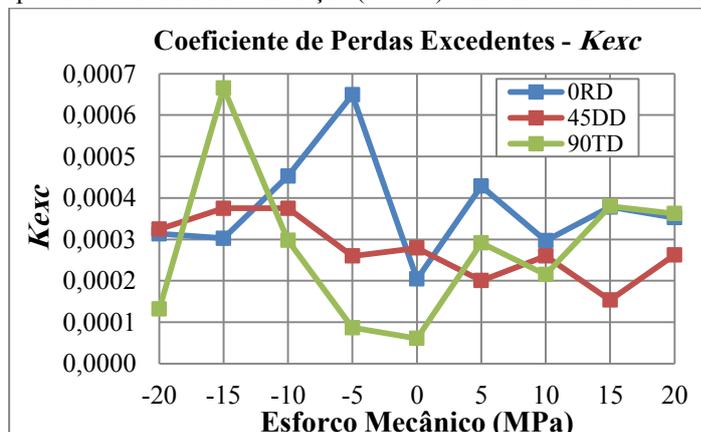
Figura 6.18: Perdas excedentes para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos (0 MPa), (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão para amostras 0RD, 45DD e 90TD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Como visto, os valores de perdas excedentes são bastante diferentes tanto sob o efeito do carregamento mecânico quanto no sentido da estampagem para este material. A Figura 6.19 apresenta o comportamento dos valores dos coeficientes K_{exc} encontrados, não tendo um padrão.

Figura 6.19: Valores dos coeficientes de perdas excedentes K_{exc} para esforços de 5 MPa a 20 MPa de tração e compressão e no caso sem esforços (0 MPa) nas três amostras analisadas.



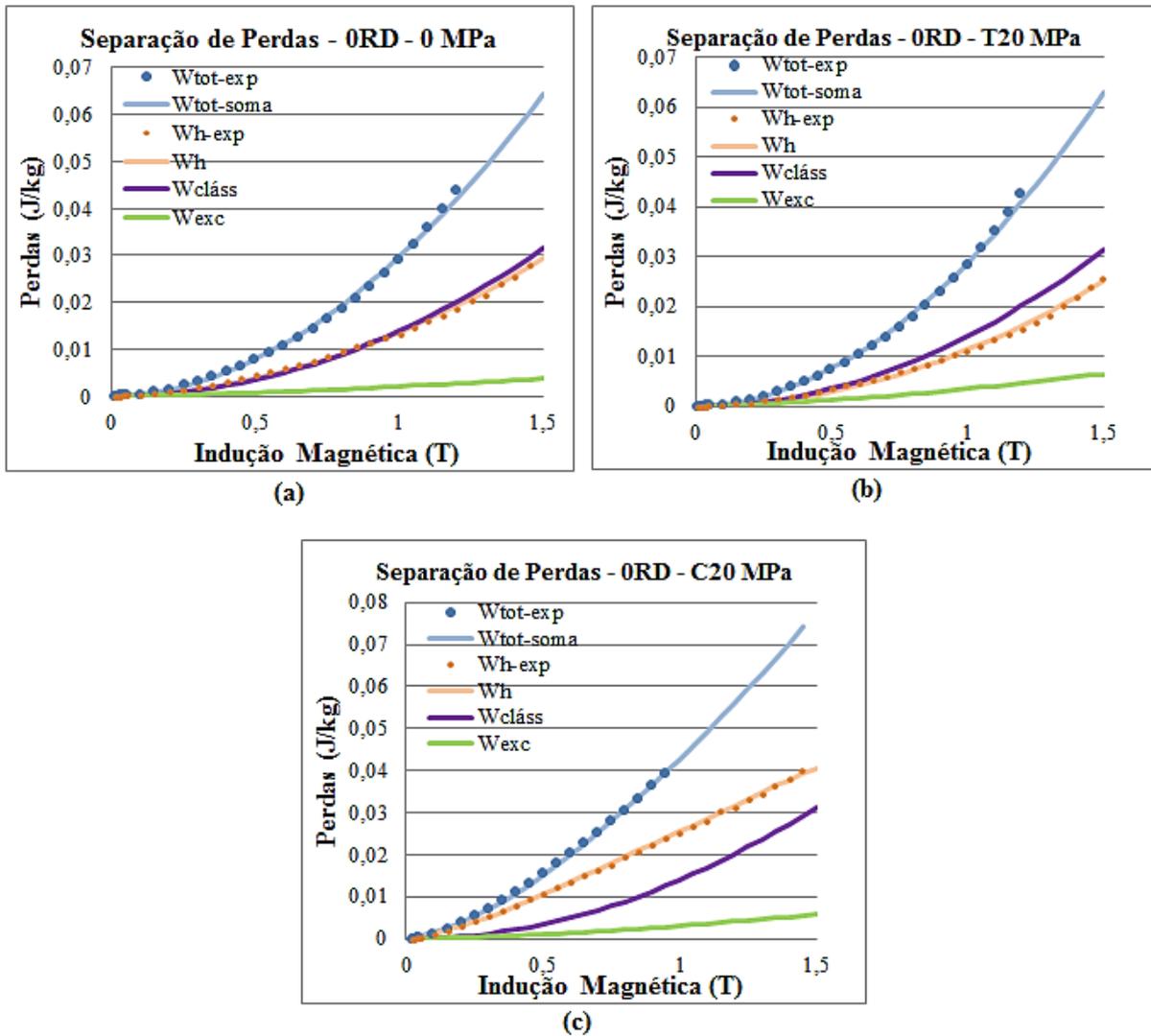
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

6.3. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DOS TIPOS DE PERDAS EM CONJUNTO

Nesta seção são apresentados resultados completos de separações de perdas para amostras com direções de laminação longitudinal (0DD), diagonal (45DD) e transversal (90TD) quando submetidos aos esforços de 20 MPa de tração e de compressão, bem como sem aplicação de esforços. Os demais níveis de esforços (tensões de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa em compressão e tração) estão apresentados no APÊNDICE C deste trabalho.

Na Figura 6.20 são apresentados os resultados de separação de perdas para a amostra 0RD para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) em 20 MPa de tração e (c) em 20 MPa de compressão. Nos gráficos da Figura 6.20, as curvas compostas pelos círculos são os valores de perdas experimentais (círculos na cor azul representam as perdas totais e os círculos na cor laranja representam as perdas por histerese). As curvas representadas em linhas contínuas nas cores roxa, verde e laranja representam os valores obtidos pelos modelos de perdas clássicas (equação (3.16)), excedentes (equação (3.18)) e histerese (equação (3.9)), respectivamente. A curva contínua na cor azul representa o somatório dos valores obtidos pelos modelos das perdas clássicas, excedentes e de histerese. Nesta amostra, quando submetida à compressão de 20 MPa, foi possível chegar apenas à 0,95 T devido às condições limitantes da bancada. Foi possível obter para esta amostra (0RD) valores de perdas totais e perdas por histerese que, em geral, representam relativamente bem os valores experimentais. As diferenças relativas entre valores calculados e experimentais das perdas totais para induções magnéticas superiores a 0,2 T foram inferiores a 7% em 20 MPa de compressão e no caso sem esforços; e inferiores a 4% em 20 MPa de tração. As diferenças relativas para as perdas por histerese (modeladas e experimentais) em induções superiores a 0,2 T foram inferiores a 2% em 20 MPa de compressão. Para os casos sem esforços e de 20 MPa de tração, as diferenças relativas foram na ordem de 20% entre 0,1 T e 0,6 T e a partir desta indução, as diferenças foram inferiores a 11%. Para induções menores que 0,1 T, as perdas por histerese tiveram diferenças relativas mais significativas.

Figura 6.20: Separação de perdas para a amostra com direção de corte longitudinal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.

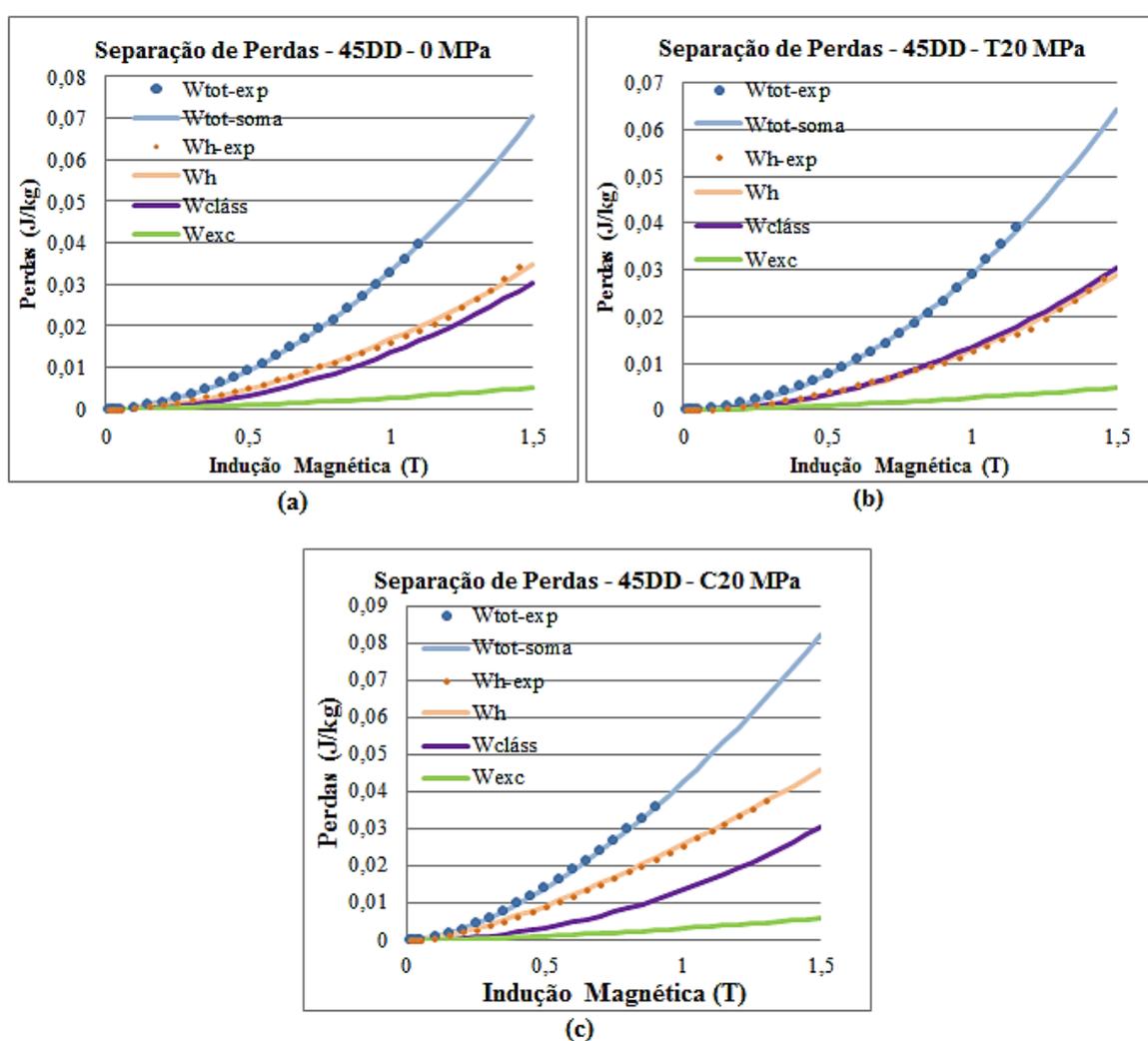


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 6.21 são apresentados os resultados de separação de perdas para a mostra 45DD para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) em 20 MPa de tração e (c) em 20 MPa de compressão. São também apresentadas comparações entre perdas totais experimentais e o somatório dos valores obtidos pelos três modelos das parcelas de perdas, bem como os valores experimentais de perdas por histerese e a sua curva obtida pelo modelo. Nas comparações entre dados experimentais e modelados, obteve-se resultados relativamente satisfatórios. As diferenças relativas entre valores calculados e experimentais das perdas totais para induções magnéticas superiores a 0,2 T foram inferiores a 5% em 20 MPa de compressão, inferiores a 2% no caso sem esforços e inferiores a 10% em 20 MPa de tração. As diferenças relativas para as perdas por histerese (modeladas e experimentais) em induções

superiores a 0,2 T foram inferiores a 8% em 20 MPa de compressão. Para os casos sem esforços e de 20 MPa de tração, as diferenças relativas foram na ordem de 20% entre 0,1 e 0,6 T e a partir desta indução, as diferenças foram inferiores a 8%. Para induções menores que 0,1 T, as perdas por histerese tiveram diferenças relativas mais significativas. Nesta amostra, foi mais difícil obter resultados experimentais na frequência de 100 Hz. Por esse motivo, em todos os casos aqui descritos, tem-se menos pontos de medição que para as outras amostras, inclusive nos ensaios sem esforços mecânicos e em tração.

Figura 6.21: Separação de perdas para a amostra com direção de corte diagonal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.

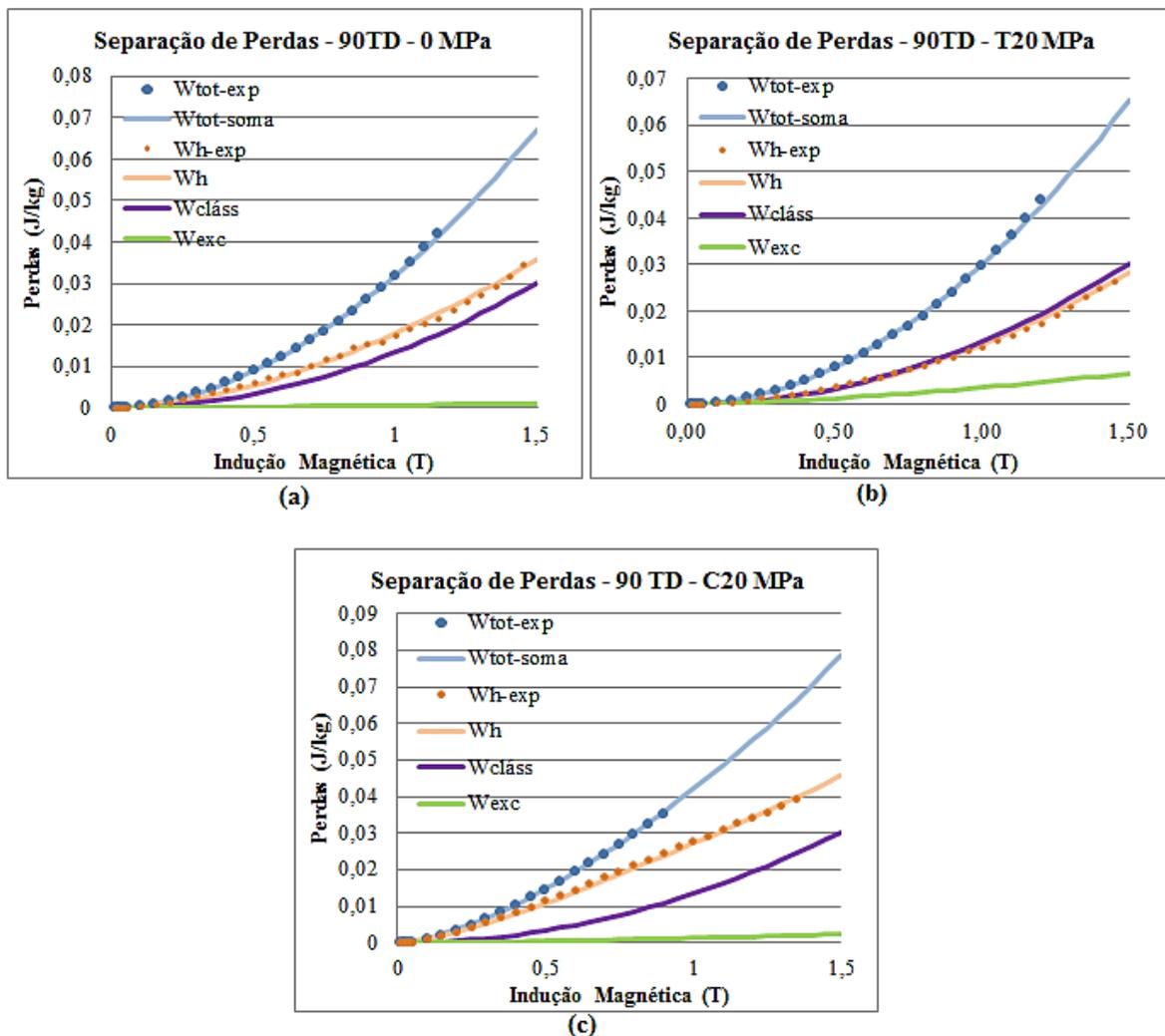


Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 6.22 são apresentados os resultados de separação de perdas para a mostra 90TD para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) em 20 MPa de tração e (c) em 20 MPa de compressão. As diferenças relativas entre valores calculados e experimentais

das perdas totais para induções magnéticas superiores a 0,2 T foram inferiores a 13% em 20 MPa de compressão, inferiores a 3% no caso sem esforços e inferiores a 3% em 20 MPa de tração. As diferenças relativas para as perdas por histerese (modeladas e experimentais) em induções superiores a 0,2 T foram inferiores a 7% em 20 MPa de compressão. Para os casos sem esforços e de 20 MPa de tração, as diferenças relativas foram na ordem de 20% entre 0,1 T e 0,6 T e a partir desta indução, as diferenças foram inferiores a 9%. Para induções menores que 0,1 T, as perdas por histerese tiveram diferenças relativas mais significativas. Na amostra, foi possível alcançar valores mais elevados de indução no ensaio de 100 Hz.

Figura 6.22: Separação de perdas para a amostra com direção de corte transversal para os casos: (a) sem aplicação de esforços mecânicos, (b) 20 MPa de tração e (c) 20 MPa de compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Em geral, os modelos de separação de perdas utilizados representam satisfatoriamente os valores obtidos experimentalmente, principalmente em relação às perdas totais.

7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, efetuou-se continuamente uma pesquisa bibliográfica, em específico sobre os principais temas que integram esta dissertação: acoplamento magnetomecânico e separação de perdas magnéticas. Esta revisão foi fundamental para consolidar conceitos importantes e localizar a pesquisa no estado da arte. Além disso, as referências utilizadas auxiliaram consideravelmente na realização de análises e obtenção de conclusões colocadas ao longo do manuscrito. Neste contexto, realizaram-se análises das propriedades magnéticas de três amostras de um mesmo material, mas com diferentes direções de corte. Aplicaram-se modelos de perdas magnéticas. As representações dos modelos empregados foram analisadas e se determinaram os valores de seus parâmetros. Para as amostras (aço silicioso de grão não orientado, com direções de corte longitudinal (0°), diagonal (45°) e transversal (90°)), foram analisados os comportamentos das perdas magnéticas, do campo coercitivo, da indução remanente e da permeabilidade magnética em níveis de carregamentos de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa em tração e compressão. Os resultados destas propriedades com esforços foram comparados com o caso de 0 MPa, ou seja, sem esforços.

Na abordagem experimental, empregou-se uma bancada magnetomecânica construída em trabalhos realizados anteriormente no GRUCAD. Algumas modificações foram realizadas na bancada magnetomecânica original durante o desenvolvimento deste mestrado, aprimorando as condições de operações dos ensaios, principalmente com o acondicionamento do sistema de filtragem/amplificação dos sinais de tensão dos sensores-H, incluindo também uma blindagem eletromagnética. Na medida do possível, realizaram-se algumas comparações experimentais de desempenho da bancada magnetomecânica com a bancada calibrada comercial Brockhaus®. Os resultados da comparação mostraram que bancada magnetomecânica fornece medições confiáveis. Os comportamentos magnetomecânicos do material sob esforços mecânicos obtidos experimentalmente foram similares ao apresentado na literatura. Quando aplicados esforços de tração, ocorreu uma leve diminuição (as curvas de perdas em função do esforço de tração são relativamente próximas) dos valores das perdas magnéticas. Quando aplicados esforços de compressão, os valores das perdas sofreram aumentos significativos com o aumento do carregamento. Com relação aos valores de campo coercitivo, notou-se semelhança de comportamento com as perdas magnéticas: há um aumento significativo em compressão e uma redução relativamente sutil em tração. Esses resultados foram semelhantes para as amostras com direções de corte diferentes. Os valores

de indução remanente e da permeabilidade magnética relativa máxima (ou até mesmo as curvas de permeabilidade relativa) possuem comportamentos semelhantes: para estas amostras, apresentaram diminuição considerável de seus valores conforme se aumenta esforços de compressão, e um incremento em tração (no texto, apresentaram-se valores de aumento ou diminuição relativos).

Análises comparativas entre os modelos que representam as perdas por histerese mostraram que o modelo 6 (equacionamento utilizando um polinômio de sexta ordem) forneceu valores mais próximos ao experimentais (para estas amostras, principalmente em valores de induções magnéticas menores que 0,25 T). Avaliações dos parâmetros dos seis modelos de representação das perdas por histerese em função dos esforços mecânicos mostraram que os modelos de potência (modelos 1, 2, 3 e 4) tiveram comportamentos e valores do coeficiente K_h próximos (diferenças inferiores a 4%). Dentre os modelos analisados, os parâmetros do modelo 6 foram os que menos apresentaram padrões de comportamentos, tanto em relação às três amostras quanto aos esforços aplicados. O modelo 4 apresentou relativamente boa aproximação dos valores experimentais de perdas por histerese e padrões definidos nos comportamentos dos valores dos parâmetros, podendo ser utilizado em simulações numéricas de cálculos de campos com elementos finitos, por exemplo.

A separação de perdas em uma mesma condição de operação de esforço foi realizada em três processos diferentes. i) No primeiro processo, obteve-se os parâmetros do modelo de histerese e de perdas dinâmicas. Os valores encontrados para os parâmetros das perdas dinâmicas sofreram variações conforme o esforço mecânico aplicado. Entretanto, essas variações nos valores dos parâmetros não foram tão significativas como ocorridas nas variações dos parâmetros das perdas por histerese. Este fato foi comprovado quando se compararam as curvas modeladas das perdas dinâmicas para as três amostras, tanto para os esforços aplicados quanto para as três amostras sob um mesmo nível de tensão mecânica. ii) No segundo processo de separação de perdas, segregou-se as perdas dinâmicas em perdas clássicas e perdas excedentes. Nesta investigação, os valores dos coeficientes das perdas clássicas não sofrem variação significativa em função de esforços mecânicos. Isto indica que não há influência significativa dos esforços mecânicos no valor do coeficiente $K_{cláss}$ (para as três amostras, os valores de diferenças relativas entre os valores de $K_{cláss}$, com e sem esforços, foram menores que 11%). Concordando com as referências sobre este assunto, infere-se que a variação ocorrida nos parâmetros das perdas dinâmicas se deve principalmente por influência das perdas excedentes. iii) No terceiro processo de separação, foi avaliado o comportamento das perdas excedentes (o coeficiente de perdas clássicas de 0 MPa para cada amostra foi

fixado). Não foram encontrados padrões evidentes nos comportamentos dos coeficientes K_{exc} , tanto para as três amostras quanto em função dos esforços mecânicos aplicados.

As curvas obtidas a partir da metodologia empregada para separações de perdas realizadas foram analisadas em conjunto. Constatou-se que as curvas modeladas encontradas representam satisfatoriamente as perdas experimentais nas três amostras. As diferenças entre os valores das curvas de perdas por histerese e as obtidas através do modelo tiveram em seus piores casos na ordem de 20% de diferenças relativas aos valores experimentais (para faixas entre 0,1 a 0,6 T). Nas demais induções, as diferenças foram inferiores a 11%. Na comparação entre os valores das perdas totais experimentais e os valores obtidos através do somatório das três parcelas de perdas, as diferenças relativas foram inferiores a 8% para induções superiores a 0,1 T.

7.1. PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesquisa realizada neste trabalho mostra um avanço nos estudos de determinação do comportamento dos parâmetros de modelos de perdas magnéticas em função de esforços mecânicos. Estes estudos possibilitam a aplicação de modelos simples em programas de cálculos de campos através do método de elementos finitos para simulações de máquinas elétricas.

Sugere-se investigar a possibilidade de se aumentar os níveis de esforços aplicados às amostras durante os ensaios. Neste trabalho, aplicaram-se esforços entre 20 MPa de compressão e 20 MPa de tração. Nesta bancada, utilizando amostras de seções transversais semelhantes as deste trabalho, seria possível atingir esforços de cerca de 40 MPa. Mas, aumentar a imposição dos esforços na bancada experimental utilizada, principalmente quando se trata de esforços de compressão, implica na necessidade de uma utilização cuidadosa da caixa anti-flambagem, a fim de se evitar a inutilização da mesma (especialmente devido aos parafusos, por serem de material plástico). Por precaução, realizou-se ensaios nos níveis de esforços mencionados (até 20 MPa). Para se elevar os níveis dos carregamentos impostos (forças acima de 2500 N), seria necessária a aquisição de um novo equipamento de tração/compressão universal.

Recomenda-se realizar um estudo acerca da repetitividade dos resultados obtidos com a utilização da bancada magnetomecânica. Uma investigação metrológica pode fornecer resultados mais confiáveis e mais homogêneos.

Sugere-se também realizar uma análise mais detalhada das perdas excedentes, aplicando modelos existentes na literatura que levam em conta a variação nos parâmetros n_0 e

V_0 do modelo de Bertotti. Provavelmente esta investigação seja facilitada fazendo com que a frequência seja variada em mais pontos experimentais.

Sob o aspecto da bancada magnetomecânica, sugere-se investigar a possibilidade de acrescentar enrolamentos de compensação de fluxos dispersos para aprimorar a média do valor de indução na amostra e aprimorar a blindagem dos sensores de campo magnético, além de toda a parte constitutiva da bancada em si (tais como fonte de excitação, trocar os sensores Bobina-H por sensores AMR (CARDENUTO, 2019)).

Outro estudo interessante, com uma mesma estratégia semelhante à realizada neste trabalho, propõe-se a investigação de laços menores de histerese, ou quando há a presença de um fluxo contínuo na amostra (SIMÃO, 2008), sob efeitos de tensões mecânicas.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Z. Selection of materials for production. In: **Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control**. [s.l.] Elsevier, 2006. p. 479–549.
- AYDIN, U. et al. Magneto-mechanical modeling of electrical steel sheets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 439, p. 82–90, 2017.
- BAGHEL, A. P. S. et al. Effect of mechanical stress on different core loss components along orthogonal directions in electrical steels. **Electrical Engineering**, v. 101, n. 3, p. 845–853, 2019.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012.
- BATISTELA, N. J. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- BELAHCEN, A. et al. Anisotropic and strain-dependent model of magnetostriction in electrical steel sheets. v. 51, n. 3, p. 2–5, 2015.
- BERNARD, L. et al. Effect of stress on switched reluctance motors: a magneto-elastic finite-element approach based on multiscale constitutive laws. v. 47, n. 9, p. 2171–2178, 2011.
- BERNARD, L.; DANIEL, L. Effect of stress on magnetic hysteresis losses in a switched reluctance motor: Application to stator and rotor shrink fitting. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, n. 9, 2015.
- BERTOTTI, G. Space-time correlation properties of the magnetization process and eddy current losses: Applications. I. Fine wall spacing. **Journal of Applied Physics**, v. 55, n. 12, p. 4339–4347, 1984.
- BERTOTTI, G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations. **Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 6, p. 2110–2117, 1985a.
- BERTOTTI, G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. II. Analysis of experimental results. **Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 6, p. 2118–2126, 1985b.
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions On Magnetics**, v. 24, n. 1, p. 621–630, 1988.
- BERTOTTI, G. Hysteresis in magnetism. **Hysteresis in Magnetism**, v. 348, n. 6302, p. 73–102, 1998a.
- BERTOTTI, G. Hysteresis in magnetism. **Hysteresis in Magnetism**, v. 348, n. 6302, p. 73–102, 1998b.
- BERTOTTI, G.; FIORILLO, F.; MAZZETTI, P. Basic principles of magnetization processes and origin of losses in soft magnetic materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 112, p. 146–149, 1992.
- BISHOP, J. E. L. Enhanced eddy current loss due to domain displacement. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 49, n. 3, p. 241–249, 1985.
- BOHN, F. et al. **Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não-orientado**. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2004

- BOHN, F. **Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- BOZORTH, R. Concepts of ferromagnetism. In: **Ferromagnetism**. New York: IEEE PRESS, 1978a. p. 5–13.
- BOZORTH, R. M. Stress and magnetostriction. In: **Ferromagnetism**. New York: IEEE PRESS, 1978b. v. 2p. 595–712.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. [s.l.: s.n.]. v. 94
- CARDENUTO, F. M. **Estudo e aplicação de sensor de campo magnético AMR em baixa frequência**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- CHEN, Y.; PILLAY, P. An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation. **Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)**, v. 2, n. C, p. 759–766, 2002.
- CHWASTEK, K. R. et al. A description for the anisotropy of magnetic properties of grain-oriented steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, n. 12, 2015.
- COEY, J. M. D. **Magnetism and magnetic materials**. New York: Cambridge University Press, 2010.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- DAIKOKU, A. et al. A high precision motor design method by finite element analysis considering stress distribution in stator core. **Manufacturing Engineering**, p. 366–372, 2005.
- EKREEM, N. B. et al. An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 191, n. 1–3, p. 96–101, 2007.
- ELIAS, R. A. **Estudo de dois métodos de medição de campo magnético em aços elétricos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- EMURA, M. et al. Angular dependence of magnetic properties of 2% silicon electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 226–230, p. 1524–1526, 2001.
- FIORILLO, F.; APPINO, C.; PASQUALE, M. Hysteresis in magnetic materials. In: **The Science of Hysteresis**. [s.l.: s.n.]. v. 3p. 1–190.
- GRAHAM, C. D. Physical origin of losses in conducting ferromagnetic materials (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 53, n. 11, p. 8276–8280, 1982.
- HUBERT, O.; LAZREG, S. Two phase modeling of the influence of plastic strain on the magnetic and magnetostrictive behaviors of ferromagnetic materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 424, n. June 2016, p. 421–442, 2017.
- IONEL, D. M. et al. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 42, n. 3, p. 658–667, 2006.
- JILES, D. C. Theory of the magnetomechanical effect. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 28, p. 1537–1546, 1995.
- KAI, Y. et al. Influence of stress on vector magnetic property under alternating magnetic flux

- conditions. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 47, n. 10, p. 4344–4347, 2011.
- KAI, Y. et al. Influence of stress on vector magnetic property under rotating magnetic flux conditions. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 48, n. 4, p. 1421–1424, 2012.
- KARTHAUS, J. et al. Effect of mechanical stress on different iron loss components up to high frequencies and magnetic flux densities. **COMPEL**, v. 36, n. 3, p. 580–592, 2017.
- KARTHAUS, J.; STEENTJES, S.; HAMEYER, K. **Mechanical stress-dependency of iron losses in non-oriented electrical steel sheets**. XXIV Symposium Electromagnetic Phenomena In Nonlinear Circuits. **Anais...**2016
- KRINGS, A.; SOULARD, J. Overview and comparison of iron loss models for electrical machines. **Journal of Electrical Engineering**, v. 10, p. 162–169, 2010.
- LANDGRAF, F. J. G. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos. n. June, p. 109–128, 2016.
- LEE, E. W. Magnetostriction and magnetomechanical effects. **Reports on Progress in Physics**, v. 18, n. 1, p. 184–229, 1955.
- LEUNING, N. et al. Effect of elastic and plastic tensile mechanical loading on the magnetic properties of NGO electrical steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 417, p. 42–48, 2016.
- LIU, J.; SHIRKOOHI, G. H. Anisotropic magnetic material modeling using finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 29, n. 6, p. 2458–2460, 1993.
- MAILHÉ, B. J. **Characterization and modelling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- MAILHÉ, B. J. et al. Influence of shielding on the magnetic field measurement by direct H-coil method in a double-yoked SST. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 54, n. 3, 2018.
- MAZZETTI, P. Bloch walls correlation and magnetic loss in ferromagnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 14, n. 5, p. 758–763, 1978.
- MILLER, T. J. E.; MCGILP, M. I. **PC-BDC 6.5 for Windows-Software**Glasgow, U.K.SPEED Laboratory, Univ. Glasgow,2004., , 2004.
- MIYAGI, D. et al. Estimation of iron loss in motor core with shrink fitting using FEM analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, n. 3, p. 1704–1707, 2009.
- MORRISH, A. H. The magnetization of ferromagnetic materials. In: **The Physical Principles of Magnetism**. 1. ed. [s.l.] Wiley-IEEE Press, 2001. p. 332–431.
- PENIN, R. et al. Impact of mechanical deformations of transformer corners on core losses. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, n. 4, 2015.
- PERMIAKOV, V. et al. Dependence of power losses on tensile stress for Fe – Si nonoriented steel up to destruction. v. 7854, n. May 2002, p. 13–16, 2003.
- PERMIAKOV, V. et al. Loss separation and parameters for hysteresis modelling under compressive and tensile stresses. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 272–276, n. SUPPL. 1, p. e553–e554, 2004.
- PETROVIC, D. S. Non-oriented electrical steel sheets. **Materials and technology**, v. 44, n. 6, p. 317–325, 2010.

SAEED, O. **Effect of static stress and magnetic ageing on iron losses for non oriented and grain oriented electrical steels.** [s.l.] McGill University, 2015.

SHIMANAKA, H. et al. Recent development of non-oriented electrical steel sheets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 26, n. 1–3, p. 57–64, 1982.

SIMÃO, C. **Estudo da eficiência energética de dispositivos eletromagnéticos e de suas alimentações.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

SINGH, D. et al. Effect of mechanical stress on excess loss of electrical steel sheets. v. 51, n. 11, p. 18–21, 2015.

SINNECKER, J. P. Materiais magnéticos soces e materiais ferromagnéticos Amorfos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 3, p. 396–405, 2000.

SOMKUN, S.; MOSES, A. J.; ANDERSON, P. I. Effect of magnetostriction anisotropy in nonoriented electrical steels on deformation of induction motor stator cores. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 45, n. 10, p. 4744–4747, 2009.

STEINMETZ, C. P. **On the law of hysteresis.** [s.l: s.n.].

STEINMETZ, C. P. **On the law of hysteresis.** [s.l: s.n.].

VANDEVELDE, L.; MELKEBEEK, J. A. A. Modeling of magnetoelastic material. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 38, n. 2 I, p. 993–996, 2002.

YAMAZAKI, K.; MUKAIYAMA, H.; DANIEL, L. Effects of multi-axial mechanical stress on loss characteristics of electrical steel sheets and interior permanent magnet machines. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 54, n. 3, p. 3–6, 2018.

APÊNDICE A – Validação da metodologia empregada para obtenção dos valores de parâmetros dos modelos de perdas magnéticas

Neste apêndice, são apresentados dois procedimentos de comparação realizados a fim de validar a metodologia empregada para obtenção dos valores dos parâmetros dos modelos de perdas.

A.1 PROCEDIMENTO 1

Utilizando uma curva de pontos medidos em 1 Hz na bancada magnetomecânica, comparou-se os valores dos parâmetros do modelo de potência ($W = KB^\alpha$) encontrados por dois métodos: i) valores determinados através da ferramenta "curva de tendência" do Excel para uma função de potência e ii) valores dos parâmetros do modelo de potência determinados através do procedimento normalmente empregado nesta dissertação utilizando a ferramenta *solver* do Excel. Na Tabela A.1 são apresentados os valores dos parâmetros K e α de modelos de potência que representam curvas de perdas em 1 Hz em níveis de esforços mecânicos aplicados na amostra com direção de laminação longitudinal (ORD). São apresentadas também as diferenças percentuais entre os valores dos parâmetros. Os valores do coeficiente K obtidos com os dois métodos e nas diferentes tensões mecânicas foram semelhantes (diferenças de até 10%). Os valores do expoente α obtidos pelos dois métodos foram relativamente similares quando aplicados esforços de tração, no caso sem aplicação de esforços e em 5 MPa de compressão (diferenças inferiores a 10%). Quando aplicados esforços de compressão de 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, as diferenças entre os valores de α para os dois métodos foram mais elevadas (15%, 21% e 23%, respectivamente). A fim de investigar os resultados divergentes dos expoentes de α nesses três casos de compressão é apresentada a Figura A.1. Nesta figura, tem-se gráficos com curvas de perdas magnéticas experimentais a 1 Hz (nomeada por W_{exp} e disposta pelos quadrados na cor azul), curvas dos modelos de potência obtidos pela metodologia empregada $W(M.E.)$ e pela curva de tendência $W(C.T.)$. As curvas dos modelos $W(M.E.)$ e $W(C.T.)$ são as linhas contínuas nas cores vermelha e preta, respectivamente. Na Figura A.1, tem-se ainda as diferenças relativas percentuais entre os valores de perdas experimentais e os valores obtidos com as curvas dos dois métodos (Dif. M.E. e Dif. C.T., respectivamente nas cruzes de cores vermelha e preta). Os gráficos da Figura A.1 estão dispostos nas letras de (a), (b) e (c), onde a Figura A.1(a) representa o caso de 10 MPa de compressão; a Figura A.1(b) representa o caso de 15 MPa e a Figura A.1(c) representa o caso de 20 MPa de compressão. As diferenças relativas percentuais entre os valores de perdas experimentais e os valores obtidos pela metodologia empregada foram

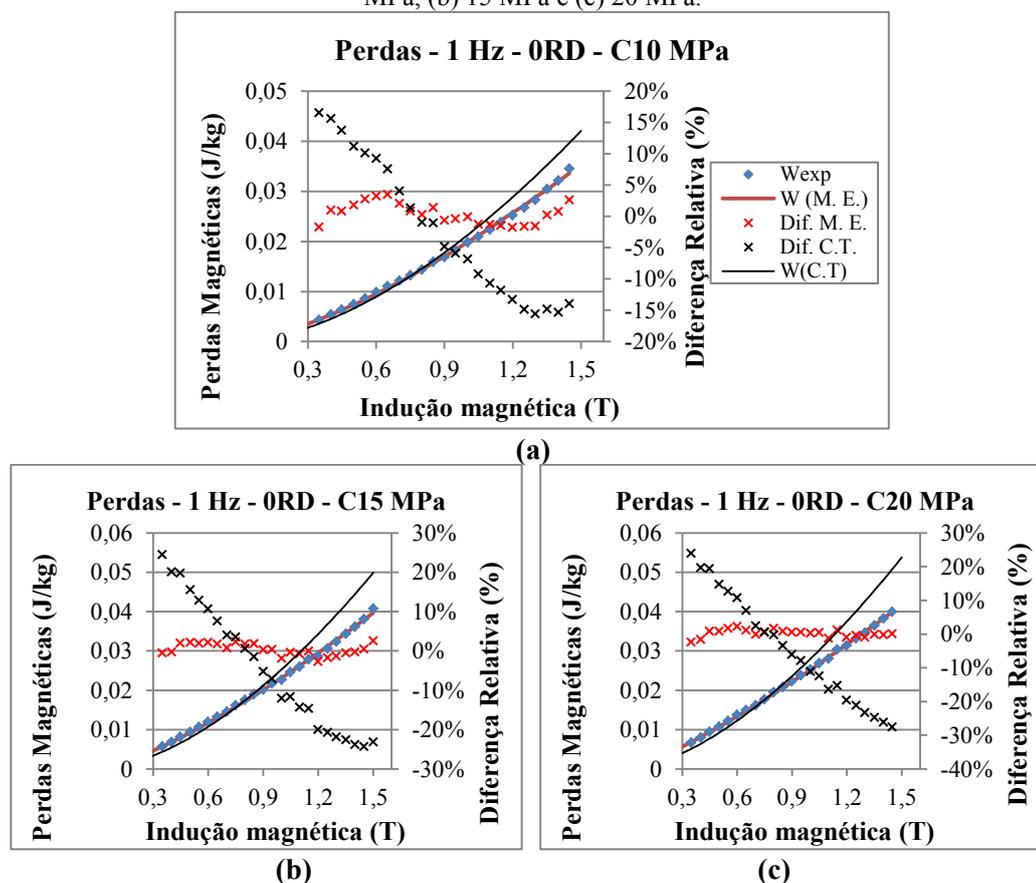
significativamente menores do que as diferenças relativas obtidas pelo modelo da curva de tendência nos três níveis de compressão analisados (nestes casos as diferenças entre os valores dos expoentes α encontrados com os dois modelos também foram significativas – vide Tabela A.1). Nota-se claramente que, nestes níveis de compressão, os valores obtidos pelo modelo de curva de tendência (curvas nas cores pretas) não representam satisfatoriamente o comportamento das perdas experimentais, principalmente em elevados valores de indução magnética (cerca de 30% de diferença). Entretanto, as diferenças entre os valores obtidos pelas curvas do modelo da metodologia empregada e as curvas experimentais foram de no máximo 6% (curvas nas cores vermelhas). As comparações das curvas foram realizadas apenas para pontos de indução magnética superiores a 0,3 T para facilitar a visualização das diferenças percentuais na escala (em ambos os modelos, as diferenças relativas aos valores de perdas experimentais em valores de indução menores que 0,3 T foram superiores a 30%). Pode-se dizer que os parâmetros do modelo de potência ($W = KB^\alpha$) obtidos a través da metodologia empregada neste trabalho são semelhantes em seis dos nove níveis de esforços mecânicos aplicados (trações de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, compressão de 5 MPa e sem aplicação de esforços). Ainda que observadas diferenças significativas entre os valores do expoente α obtidos pelas duas propostas (M.E. e C.T.) nos níveis de compressão de 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, considerou-se que a metodologia empregada nesta dissertação forneceu valores satisfatórios, pois os valores de diferenças relativas percentuais entre as perdas modeladas pela metodologia empregada e as perdas experimentais foram inferiores a 6%.

Tabela A.1: Comparação entre parâmetros do modelo de potência ($W = KB^\alpha$) obtidos através da metodologia empregada e pela curva de tendência do Excel para ensaios de 1 Hz.

Tensão (MPa)	K		Dif. Rel. K (%)	α		Dif. Rel. α (%)
	Metodologia Empregada	Curva de Tendência.		Metodologia. Empregada.	Curva de Tendência.	
T20	0,0114	0,0122	6%	1,898	1,884	-1%
T15	0,0115	0,0117	2%	1,887	1,735	-9%
T10	0,0117	0,0123	5%	1,910	1,776	-8%
T5	0,0118	0,0124	5%	1,876	1,790	-5%
0	0,0139	0,0143	3%	1,814	1,762	-3%
C5	0,0151	0,0161	6%	1,726	1,791	4%
C10	0,0198	0,0211	6%	1,430	1,677	15%
C15	0,0231	0,0254	9%	1,330	1,684	21%
C20	0,0252	0,0280	10%	1,240	1,617	23%

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura A.1: Comparação entre curvas do modelo de potência obtidos através da curva de tendência do Excel e da metodologia empregada com curvas de perdas experimentais quando aplicados esforços de compressão de (a) 10 MPa, (b) 15 MPa e (c) 20 MPa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Além das comparações realizadas entre duas maneiras de se encontrar os parâmetros do modelo de potência, foi realizada com segunda comparação que é apresentada a seguir.

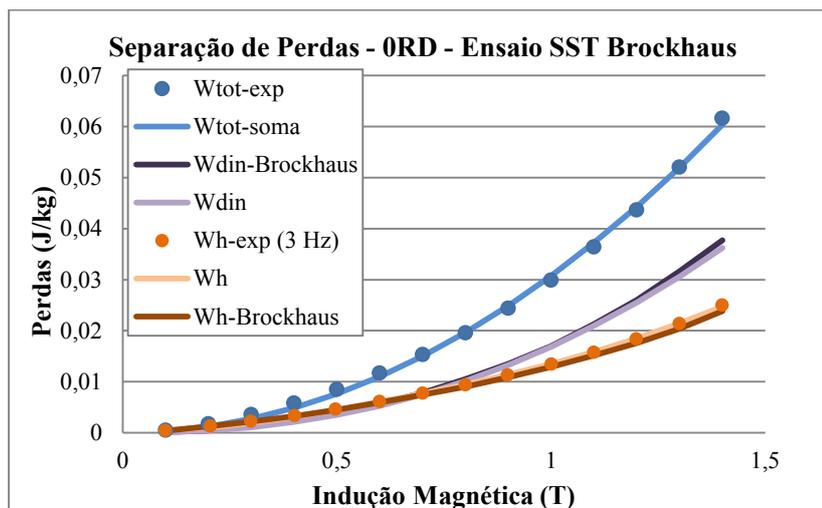
A.2 PROCEDIMENTO 2

Realizaram-se comparações entre valores de perdas dinâmicas e de perdas por histerese fornecidos pelo método de separação próprio da bancada Brockhaus® e valores de perdas dinâmicas e de histerese obtidos pela metodologia de separação de perdas utilizada nesta dissertação. As comparações foram realizadas para os casos sem esforços e com os dados de ensaios nas frequências de 100 Hz e 3 Hz realizados pela bancada comercial Brockhaus® MPG200.

Na Figura A.2, são apresentados os resultados da separação de perdas para uma amostra com laminação longitudinal ensaiada no SST da Brockhaus®. Nesta figura, as curvas de perdas experimentais obtidas pela Brockhaus® são definidas por círculos. Os círculos de cor azul são as perdas totais a 100 Hz ($W_{tot-exp}$) e os círculos de cor laranja são as perdas a 3 Hz (consideradas como perdas por histerese - W_{h-exp}). A curva em linha contínua na cor roxo claro corresponde ao modelo de perdas dinâmicas ($W_{din} = K_{din}B^\theta$) e a curva contínua na cor

laranja claro corresponde aos valores obtidos com o modelo de perdas por histerese (modelo polinomial de sexta ordem) através da metodologia empregada. A curva de perdas totais W_{total} na cor azul (contínua) é calculada pela soma de W_{din} e W_h . Os valores de perdas dinâmicas (curva contínua na cor roxo escuro) e de perdas por histerese (curva contínua na cor laranja escuro) são os valores fornecidos pela Brockhaus® ($W_{din-Brockhaus}$ e $W_{h-Brockhaus}$, respectivamente). Nesta figura, observa-se que as curvas de perdas dinâmicas e de perdas por histerese obtidas pelo método proposto e a curva fornecida pela Brockhaus® são próximas. Os valores das perdas por histerese obtidas pela metodologia empregada foram superiores ao fornecido pela Brockhaus® e os valores de perdas dinâmicas obtidas pela metodologia empregada foram inferiores aos da Brockhaus®. As diferenças relativas entre os valores de perdas dinâmicas foram inferiores a 12% e os valores de diferença relativa entre as curvas de perdas por histerese foram inferiores a 14%, entre os pontos de indução de 0,4 T e 1,4 T.

Figura A.2: Separação de perdas entre perdas dinâmicas e perdas por histerese utilizando dados de ensaios na SST da Brockhaus® e comparação com os dados fornecidos por esta bancada.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Deve-se levar em conta que, ao se considerar os valores de perdas experimentais em 3 Hz como perdas por histerese, acrescenta-se um erro de estimação deste tipo de perda, uma vez que nessa frequência, tem-se uma parcela de perdas dinâmicas. Apesar disso, os valores de perdas dinâmicas e de perdas por histerese obtidos através da metodologia de separação de perdas proposta neste trabalho (utilizando dados de ensaios do SST da Brockhaus® em frequências de 100 Hz e 3 Hz para uma amostra com direção de laminação de 0°) proporcionou resultados relativamente próximos dos valores de perdas dinâmicas e perdas por histerese fornecidos pela separação de perdas própria da Brockhaus®. Assim, consideraram-se confiáveis os resultados de valores dos parâmetros dos modelos de perdas obtidos pela metodologia empregada.

APÊNDICE B – Validação da medição da bancada magnetomecânica

A fim de validar a utilização da bancada magnetomecânica foram feitas duas comparações possíveis: i) avaliaram-se os resultados obtidos com ensaios sem aplicação de esforços mecânicos e comparou-se com dados da bancada Brockhaus® e ii) comparação entre resultados um par de lâminas de mesma direção de corte.

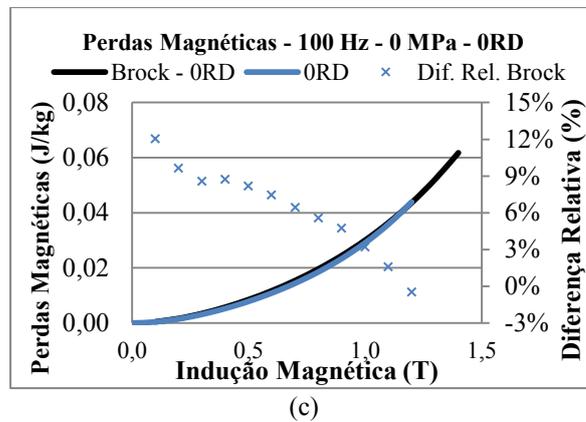
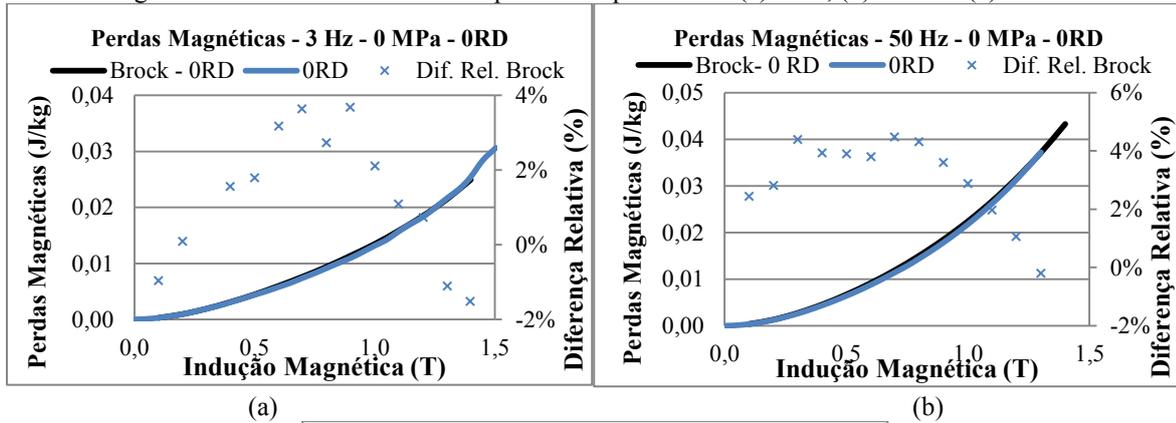
B.1. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DA BANCADA MAGNETOMECÂNICA COM A BROCKHAUS®

Foram comparadas características magnéticas (perdas magnéticas e campo magnético) em amostras de mesmo material e de mesma direção de corte, tanto na bancada magnetomecânica quanto na Brockhaus®. Devido ao dimensionamento diferente das bancadas de medição, as amostras ensaiadas nas duas bancadas não foram as mesmas. Nesta comparação, são analisados apenas resultados das amostras longitudinal e transversal, por não haver disponibilidade da amostra com direção diagonal no tamanho necessário para ensaiá-la no SST da Brockhaus®.

B.1.1. Amostras com direção de corte longitudinal

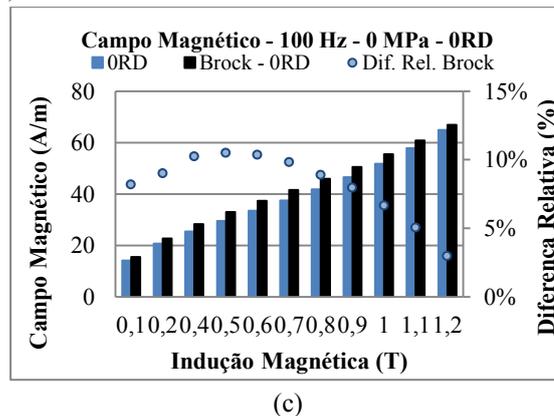
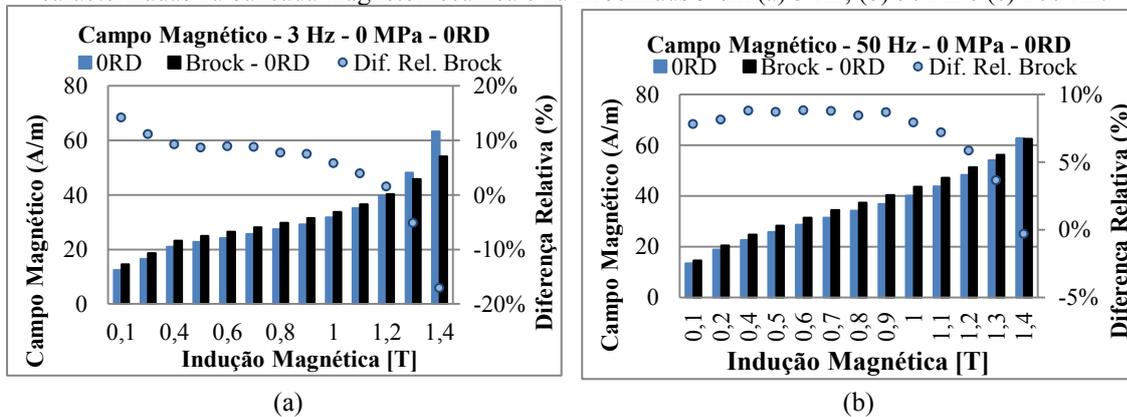
Na Figura B.1, são apresentadas curvas de perdas magnéticas nas frequências de 3 Hz, 50 Hz e 100 Hz para amostras com direção de corte longitudinal caracterizadas na bancada magnetomecânica (curvas na cor azul) e na Brockhaus® (curvas na cor preta). São apresentados também os valores de diferença percentual entre os valores de perdas da bancada magnetomecânica em relação aos valores de perdas magnéticas da bancada Brockhaus® (cruzes na cor azul). Na Figura B.1(a) tem-se as curvas de perdas à 3 Hz; na Figura B.1(b), tem-se as curvas de perdas à 50 Hz; e na Figura B.1(c), tem-se as curvas de perdas à 100 Hz. Nas três frequências analisadas, as diferenças percentuais foram inferiores a 13%. Na Figura B.2, tem-se comparações entre valores de campos magnéticos eficazes obtidos por ensaios nas duas bancadas. São também apresentados os valores de diferença relativa percentual (círculos de cor azul) entre valores de campos magnéticos eficazes obtidos na bancada magnetomecânica e na Brockhaus®. Os gráficos identificados pelas letras (a), (b) e (c) da Figura B.2 se referem às frequências de 3 Hz, 50 Hz e 100 Hz, respectivamente. Na Figura B.2(a), os valores de campo magnético obtidos no ensaio de 3 Hz apresentam, na faixa de indução magnética entre 0,2 T e 1,4 T, diferenças relativas inferiores a 11%. Nas frequências de 50 Hz (Figura B.2(b)) e 100 Hz (Figura B.2(c)), os valores de diferença relativa foram inferiores a 11% em todos os valores de indução magnética.

Figura B.1: Comparação entre perdas magnéticas de amostras com direção de 0° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® para as frequências de (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.



Fonte: Elaborada pela autora (2019)

Figura B.2: Comparação entre valores de campo magnético eficaz obtidos para amostras com direção de 0° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® em (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.



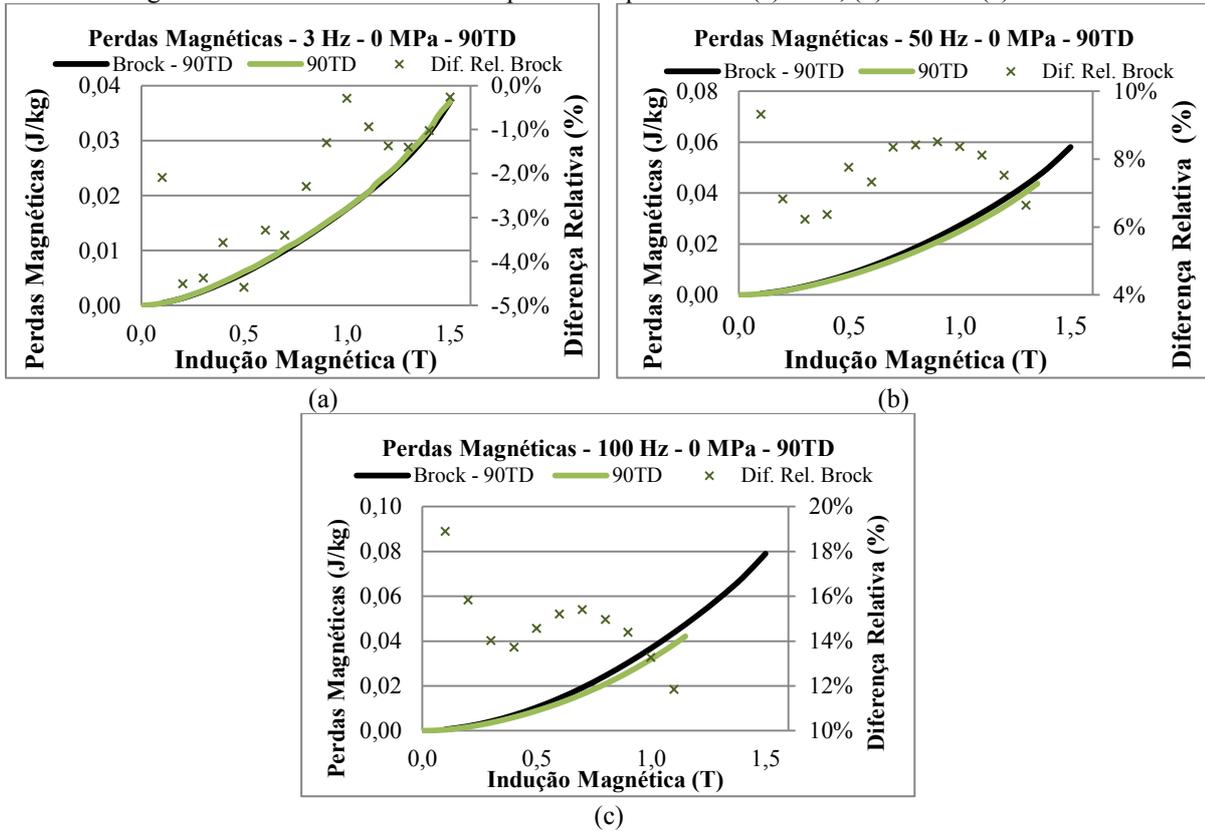
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O comportamento das comparações para os valores de perdas magnéticas e de campos magnéticos eficazes entre as duas bancadas para as lâminas com direções de laminação transversal foram semelhantes aos da amostra longitudinal e são apresentados na próxima seção.

B.1.2. Amostras com direção de corte transversal

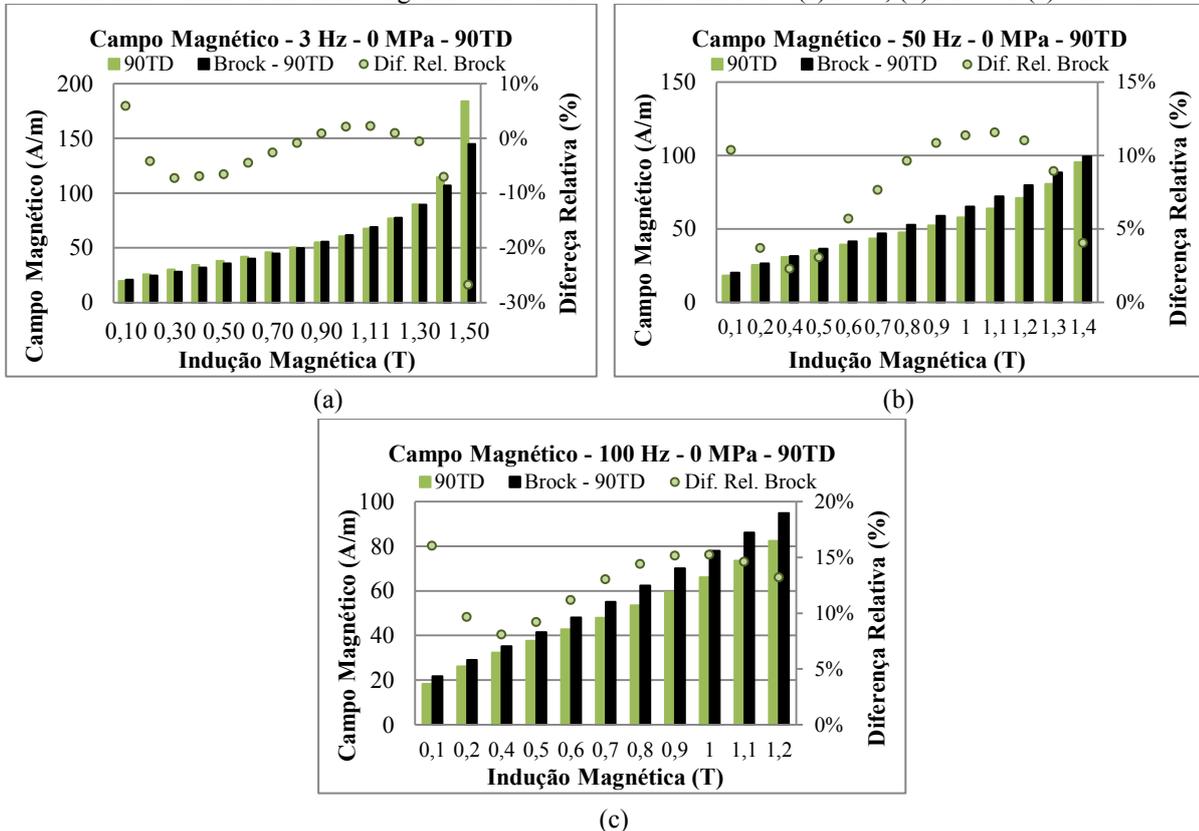
Na Figura B.3, são apresentadas curvas de perdas magnéticas para as amostras ensaiadas nas duas bancadas experimentais nas frequências de (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz. As curvas de perdas na cor verde foram obtidas com a bancada magnetomecânica e as curvas na cor preta foram obtidas com a Brockhaus®. As diferenças relativas percentuais entre os valores de perdas obtidas com as duas bancadas são indicadas pelas cruces na cor verde. Para esta amostra, na frequência de 3 Hz (Figura B.3(a)), as diferenças entre os valores de perdas medidos com as duas bancadas foram inferiores a 5%; na frequência de 50 Hz (Figura B.3(b)), as diferenças relativas foram inferiores a 10%; e na frequência de 100 Hz (Figura B.3(c)), as diferenças relativas chegaram a cerca de 20 % em induções magnéticas menores que 0,3 T. Em 100 Hz, nos demais valores de indução magnética, as diferenças relativas ficaram entre 12% e 16%. Na Figura B.4, são apresentados os valores de campo magnético para as amostras com direção de corte de 90° caracterizadas nas frequências de ensaio de: (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz. Observa-se na Figura B.4(a) que os valores de campo magnético na frequência de 3 Hz foram próximos (as diferenças relativas foram inferiores a 10% com exceção de 1,5 T). Na frequência de 50 Hz (Figura B.4(b)), as diferenças relativas foram inferiores a 13%. As maiores diferenças relativas foram encontradas no ensaio de 100 Hz (Figura B.4(c)). Em 100 Hz, com exceção da indução magnética de 0,1 T, as diferenças foram inferiores a 16%.

Figura B.3: Comparação entre perdas magnéticas obtidas para amostras com direção de 90° na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® para as frequências de (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

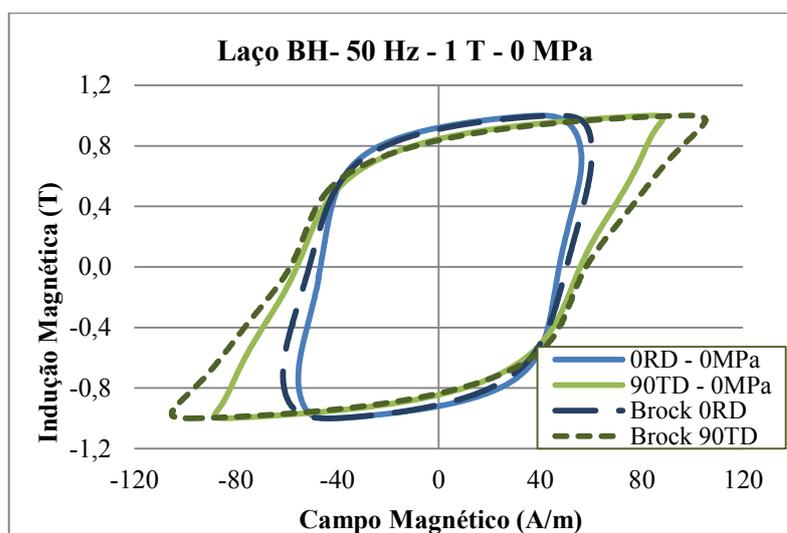
Figura B.4: Comparação entre valores de campo magnético eficaz obtidos para amostras com direção de 90° caracterizadas na bancada magnetomecânica e na Brockhaus® em (a) 3 Hz, (b) 50 Hz e (c) 100 Hz.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A fim de se comparar os formatos dos laços de perdas obtidos com as duas bancadas, são apresentados na Figura B.5 os laços BH na frequência de 50 Hz e 1 T para as amostras com direções de corte de 0° e 90°. Nesta figura, os laços em linha tracejada representam os resultados da bancada Brockhaus® e os laços em linha contínua representam os resultados da bancada magnetomecânica. Os laços na cor azul representam os laços referentes às amostras com direção de corte de 0° e os laços na cor verde representam os laços das amostras com direção de corte de 90°. Observa-se que os formatos dos pares de laços da amostra de 0° e dos pares de laços da amostra de 90° são semelhantes. As diferenças relativas entre a área das duas bancadas nestas condições (50 Hz e 1 T) para a amostra longitudinal (0°) foi de cerca de 3% e para a amostra transversal (90°) foi de aproximadamente de 8%.

Figura B.5: Comparações dos laços BxH em 50 Hz e 1 T das amostras longitudinal e transversal ensaiadas na bancada de esforços mecânicos e na Brockhaus®.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

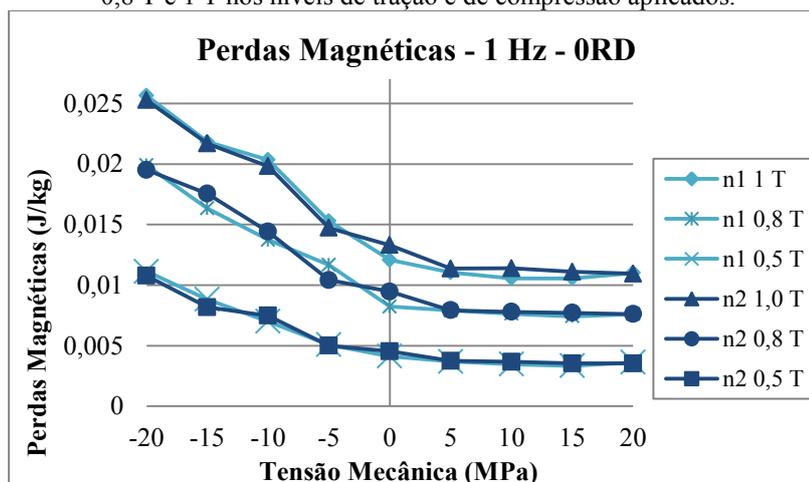
Na bancada Brockhaus®, a medição do campo magnético é realizada indiretamente, pela corrente de excitação (que pode contemplar efeitos de possíveis entreferros). Na bancada magnetomecânica, é medido de maneira direta. Com os resultados das comparações apresentadas nas seções B.1 e B.2, considera-se que os resultados encontrados com a bancada magnetomecânica são confiáveis. Para se assegurar ainda mais da validade dos resultados de caracterizações das amostras, foram realizadas as comparações apresentadas na seguinte seção.

B.2. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE PERDAS MAGNÉTICAS PARA DUAS AMOSTRAS DE MESMA DIREÇÃO DE CORTE

Esta análise foi realizada com o objetivo comparar os valores de perdas magnéticas entre duas amostras com mesma direção de corte. Foram realizados ensaios em um par de amostras de cada direção de laminação (0° , 45° e 90°), totalizando seis lâminas. As amostras foram nomeadas de n_1 e n_2 para cada direção de corte.

Na Figura B.6, são apresentados valores de perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 0° (ORD) nas induções magnéticas de 0,5 T, 0,8 T e 1 T nos níveis de esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa em tração e em compressão, bem como sem esforços (0 MPa). As curvas de perdas magnéticas em função do esforço das duas amostras são diferenciadas através dos marcadores e da cor das linhas. Para a mostra n_1 (curva na cor azul claro), os losangos, asteriscos e cruces equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente e, para a amostra n_2 (curva na cor azul escuro), os triângulos, círculos e quadrados equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente. As curvas de perdas magnéticas em função da tensão mecânica das amostras n_1 e n_2 tiveram comportamento e valores semelhantes. O par de amostras de 0° apresentaram diferenças percentuais nas perdas magnéticas inferiores a 15%. Nos casos específicos de ensaios em tração (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa) e em três níveis de compressão (10 MPa, 15 MPa e 20 MPa), as diferenças relativas foram inferiores a 8%.

Figura B.6: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 0° para induções magnéticas de 0,5 T, 0,8 T e 1 T nos níveis de tração e de compressão aplicados.

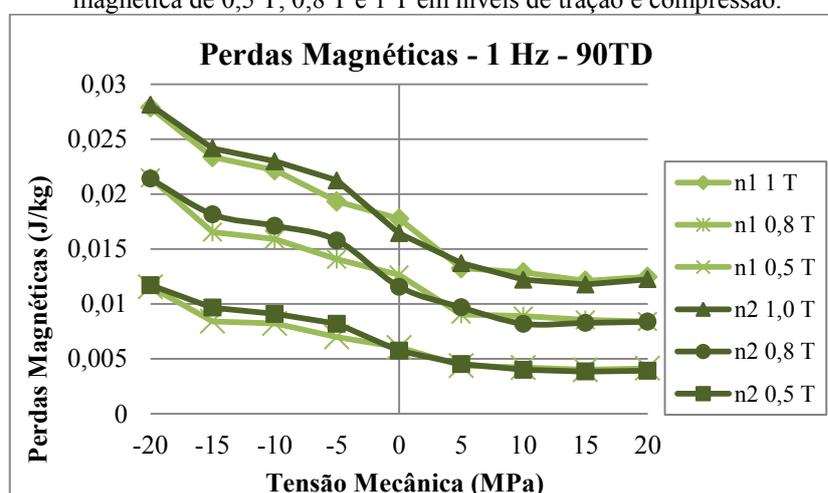


Fonte: Elaborada pela autora (2019)

A Figura B.7 apresenta resultados de perdas magnéticas a 1 Hz para duas amostras com direção de corte de 90° em induções magnéticas de 1 T, 0,8 T e 0,5 T em todos os níveis

de carregamentos mecânicos aplicados. Para a mostra n_1 (curva na cor verde claro), os losangos, asteriscos e cruzeiros equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente e, para a amostra n_2 (curva na cor verde escuro), os triângulos, círculos e quadrados equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente. Nesta figura, observa-se que o comportamento e os valores de perdas também foram próximos nas duas amostras. As diferenças relativas percentuais entre as perdas magnéticas do par de amostras de 90° foram inferiores a 17%. Nos casos específicos de ensaios em tração (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa), no caso sem esforços e em 20 MPa de compressão, as diferenças relativas foram inferiores a 8%.

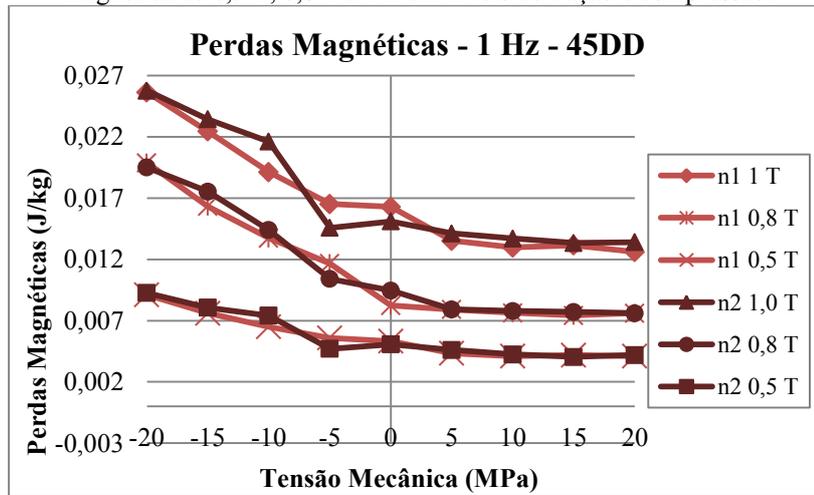
Figura B.7: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 45° relativos aos valores de indução magnética de 0,5 T, 0,8 T e 1 T em níveis de tração e compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019)

Na Figura B.8, tem-se resultados de perdas magnéticas para 1,0 T, 0,8 T e 0,5 T em todos os níveis de esforços mecânicos aplicados às duas amostras com direção de corte de 45° . Para a mostra n_1 (curva na cor vermelho claro), os losangos, asteriscos e cruzeiros equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente e, para a amostra n_2 (curva na cor vermelho escuro), os triângulos, círculos e quadrados equivalem aos níveis de indução de 1 T, 0,8 T e 0,5 T, respectivamente. Em geral, o comportamento das duas amostras foi semelhante. Mas, nos ensaios de compressão de 5 MPa da Figura B.8, nota-se que houve um comportamento não esperado da amostra n_2 , uma vez que as perdas magnéticas a 5 MPa de compressão foram menores do que no caso sem esforços. As diferenças relativas entre as amostras do par com direção de corte de 45° foram inferiores a 16%. Nos casos específicos de ensaios em tração (5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa), no caso sem esforços e em dois níveis de compressão (15 MPa e 20 MPa), as diferenças relativas foram inferiores a 7%.

Figura B.8: Perdas magnéticas em 1 Hz para duas amostras com direção 45° relativos aos valores de indução magnética de 0,5 T, 0,8 T e 1 T em níveis de tração e compressão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019)

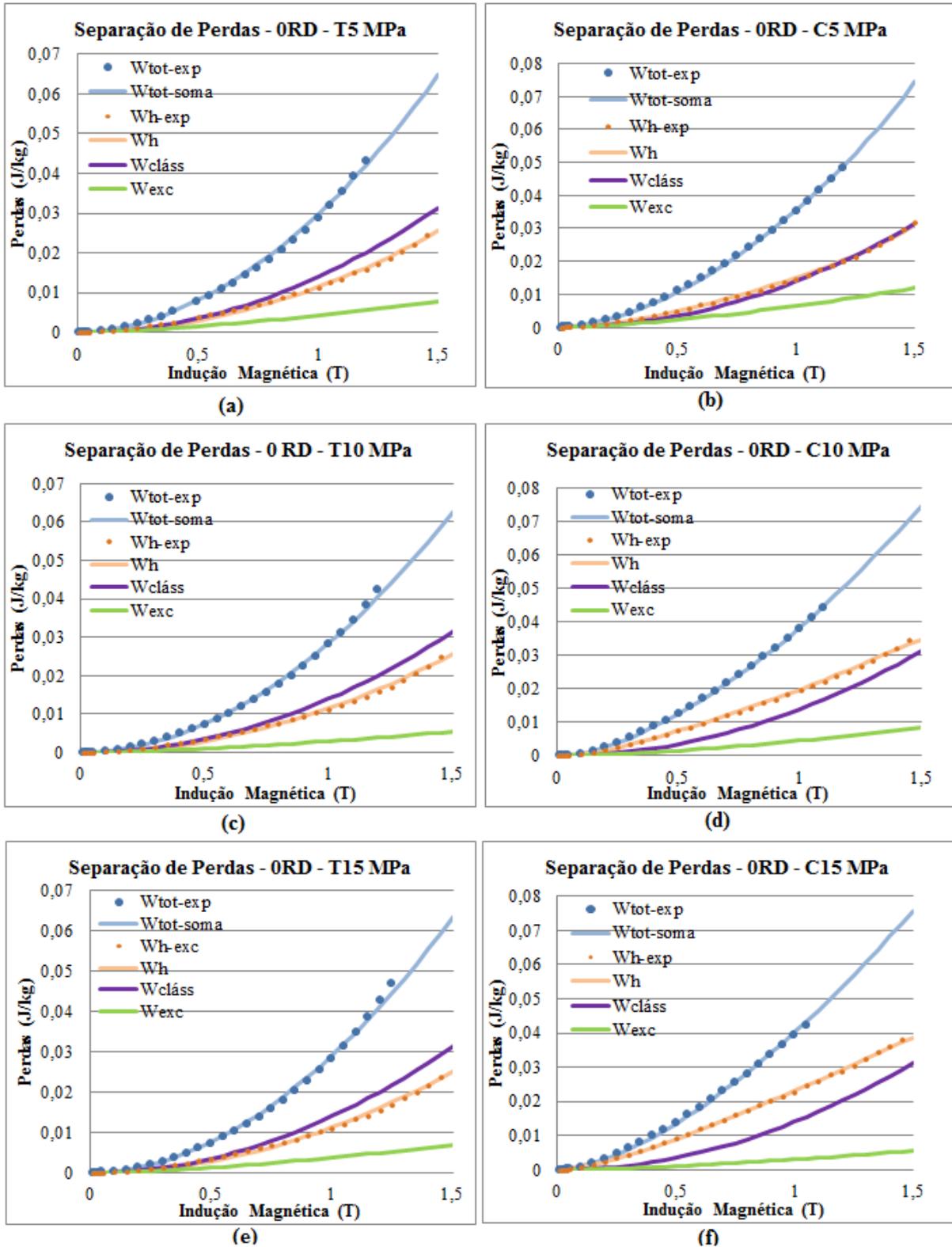
Os ensaios realizados na bancada de esforços mecânicos para pares de amostras de mesma direção de corte, apresentaram valores de perdas similares para um mesmo par de amostras. Além disso, os comportamentos das seis amostras ensaiadas também foram semelhantes (com exceção de um caso específico no caso das amostras com direção de corte de 45°).

APÊNDICE C – Resultados da separação de perdas para lâminas com direções de corte de 0°, 45° e 90 ° quando submetidas a esforços mecânicos de 5 MPa, 10 MPa e 15 MPa de tração e compressão.

A separação de perdas foi realizada para três amostras com direções de corte longitudinal, diagonal e transversal em níveis de tensão mecânicas entre 5 MPa a 20 MPa em tração e em compressão, bem como no caso sem aplicação de esforços. Na seção 6.3 do capítulo 6, foram apresentados os comportamentos das perdas magnéticas em conjunto para os níveis de esforços de 20 MPa de tração e de compressão e no caso de 0 MPa. Neste apêndice, são apresentados os gráficos de separação de perdas dos níveis de 5 MPa, 10 MPa e 15 MPa de tração e de compressão.

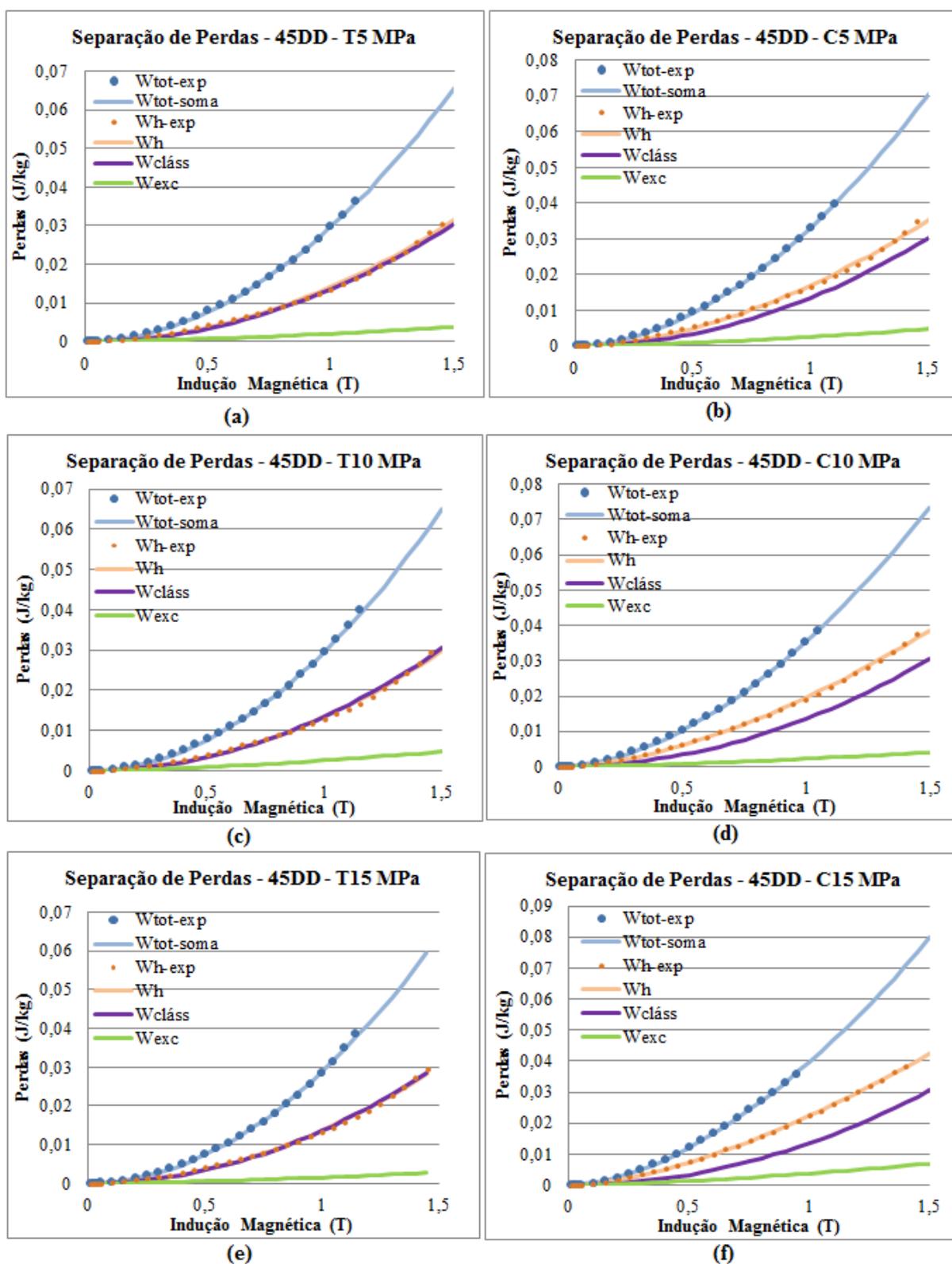
Nas Figuras C1, C2 e C3, são apresentados os resultados de separação de perdas para as amostras 0RD, 45 DD e 90 TD, respectivamente. Os gráficos dessas figuras representam os casos de: (a) 5 MPa de tração, (b) 5 MPa de compressão, (c) 10 MPa de tração, (d) 10 MPa de compressão, (e) 15 MPa de tração e (f) 15 MPa de compressão. Nos gráficos dessas figuras, as curvas compostas pelos círculos são os valores de perdas experimentais (círculos na cor azul representam as perdas totais e os círculos na cor laranja representam as perdas por histerese). As curvas representadas em linhas contínuas nas cores roxa, verde e laranja representam os valores obtidos pelos modelos de perdas clássicas (equação (3.16)), excedentes (equação (3.18)) e histerese (equação (3.9)), respectivamente. A curva contínua na cor azul representa o somatório dos valores obtidos pelos modelos das perdas clássicas, excedentes e de histerese. Na Figura C.1, observa-se que foi possível obter valores de perdas totais e perdas por histerese que representam relativamente bem os valores experimentais para esta amostra (0RD). Na Figura C.2, observa-se que os modelos das perdas representaram de maneira satisfatória os resultados experimentais de perdas da amostra 45DD. Na Figura C.3, tem-se os resultados de separação de perdas magnéticas da amostra 90TD. Observa-se nesta figura que os modelos de perdas representaram as perdas experimentais de maneira satisfatória.

Figura C.1: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte 0° (0RD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.



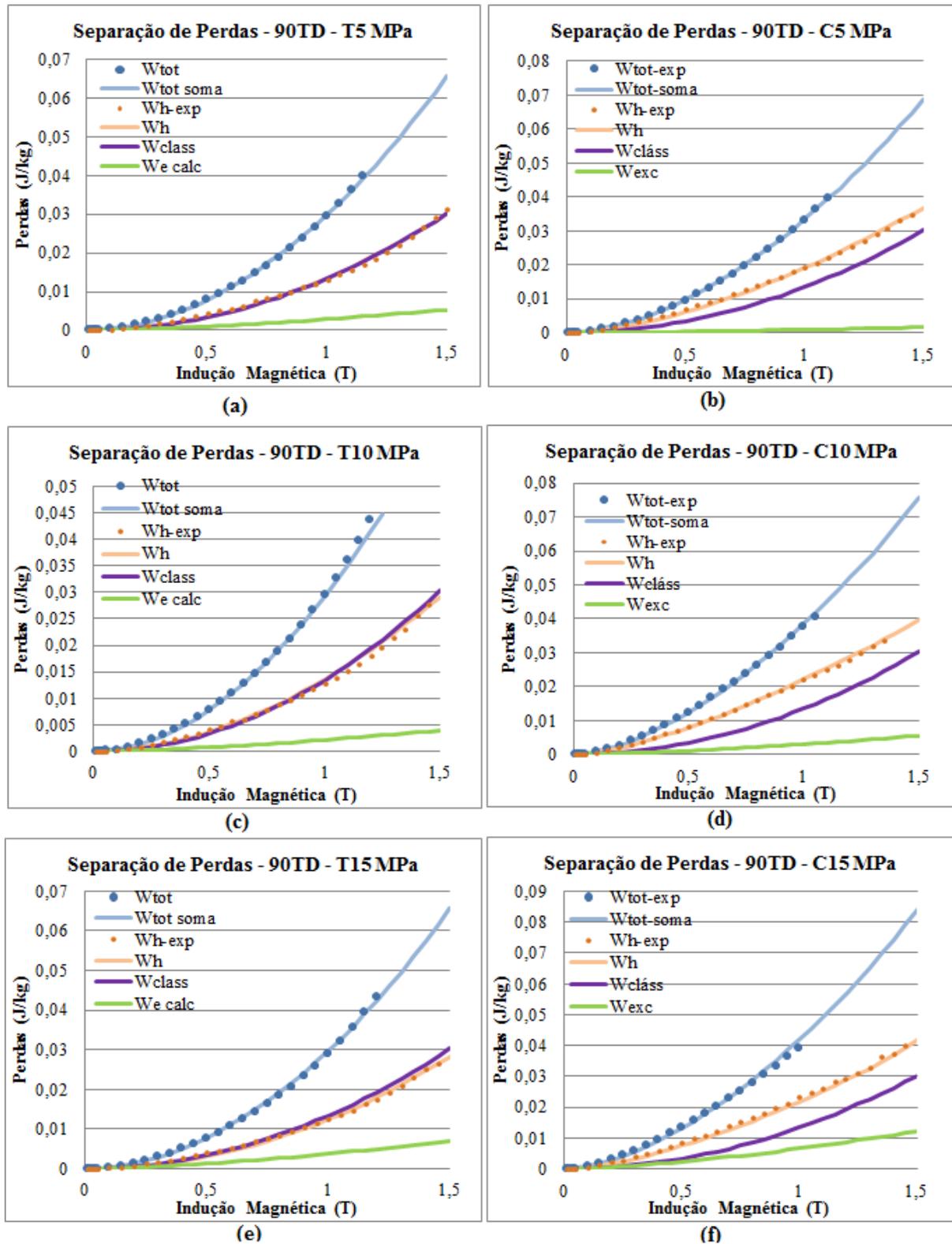
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura C.2: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte de 45° (45DD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura C.3: Resultados de separação de perdas da amostra com direção de corte de 90° (90TD) quando submetidas aos níveis de esforços: (a) compressão de 5 MPa, (b) tração de 5 MPa, (c) tração de 10 MPa, (d) compressão de 10 MPa, (e) tração de 15 MPa e (f) compressão de 15 MPa.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

APÊNDICE D – Estudo preliminar de equacionamento para representação do comportamento dos parâmetros de modelos de perdas por histerese em função de esforços mecânicos

Neste apêndice, foi realizado um estudo preliminar de representação dos comportamentos dos parâmetros dos modelos de perdas por histerese (em função dos esforços mecânicos aplicados) apresentados no capítulo 6. Ou seja, a partir dos valores de cada parâmetro, foi encontrada uma equação (modelo) em função do valor de σ . Os valores dos parâmetros foram encontrados através da utilização de modelos de separação de perdas magnéticas utilizando a ferramenta *solver* do Excel. Os modelos de perdas utilizados nas análises e discussões de resultados e apresentados ao longo deste trabalho estão descritos no capítulo 3 e são sumarizados na Tabela D.1 abaixo. Tem-se em conta, que este é um estudo preliminar, visto que a faixa de tensão mecânica em que foram realizados os ensaios experimentais é relativamente reduzida (até 20 MPa de tração e de compressão).

Tabela D.1: Resumo de modelos para cada tipo de perdas e suas respectivas formulações.

Tipo de perdas	Formulação
Perdas por histerese	$W_{h-1} = K_h B_p^\alpha$
	$W_{h-2} = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p}$
	$W_{h-3} = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2}$
	$W_{h-4} = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2 + \alpha_3 B_p^3}$
	$W_{h-5} = x_1 B_p + x_2 B_p^2$
	$W_{h-6} = x_0 + x_1 B_p + x_2 B_p^2 + x_3 B_p^3 + x_4 B_p^4 + x_5 B_p^5 + x_6 B_p^6$
Perdas dinâmicas	$W_{din} = K_{din} B_p^\theta$
Perdas clássicas	$W_{cláss} = K_{cláss} B_p^2$
Perdas excedentes	$W_{exc} = K_{exc} B_p^{1,5}$

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tentativas de determinação de equacionamentos que representem os coeficientes das perdas magnéticas foram realizadas sobre os modelos 1 a 4 das perdas por histerese. Os valores dos coeficientes dos modelos de perdas por histerese 5 e 6, e do modelo de perdas excedentes (K_{exc}) não tiveram um padrão de comportamento definido e, por isso, não são apresentados neste apêndice. Além disso, também não serão apresentadas equações para modelar os comportamentos dos parâmetros das perdas dinâmicas e das perdas clássicas, pois, apresentam comportamentos praticamente constantes (como mostrado na seção 6.2 deste trabalho). Foram analisados os resultados das três amostras com diferentes direções de corte.

D.1. EQUACIONAMENTO DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DO MODELO 1 DE PERDAS POR HISTERESE

Os parâmetros do modelo 1 de representação das perdas por histerese consistem em K_h e em α . Em (D.1) e em (D.2) são apresentadas as equações encontradas¹³ para representar o comportamento de K_h e α (da amostra 0RD), respectivamente. Em (D.3) e (D.4) são apresentadas as equações que representam, respectivamente, o comportamento de K_h e α (da amostra 45DD). As equações encontradas para representar o comportamento de K_h e α (da amostra 90TD) são (D.5) e (D.6), respectivamente. Nestas equações, σ é o esforço mecânico.

$$K_{h\ 0RD} = 1,22 E^{-5} \sigma^2 - 3,65 E^{-4} \sigma + 1,39 E^{-2} \quad (D.1)$$

$$\alpha_{0RD} = -1,54 E^{-5} \sigma^3 - 5,99 E^{-4} \sigma^2 + 2,26 E^{-2} \sigma + 1,779 \quad (D.2)$$

$$K_{h\ 45DD} = 8,8 E^{-6} \sigma^2 - 3,06 E^{-4} \sigma + 1,59 E^{-2} \quad (D.3)$$

$$\alpha_{45DD} = -1,04 E^{-5} \sigma^3 - 3,42 E^{-4} \sigma^2 + 1,49 E^{-2} \sigma + 1,849 \quad (D.4)$$

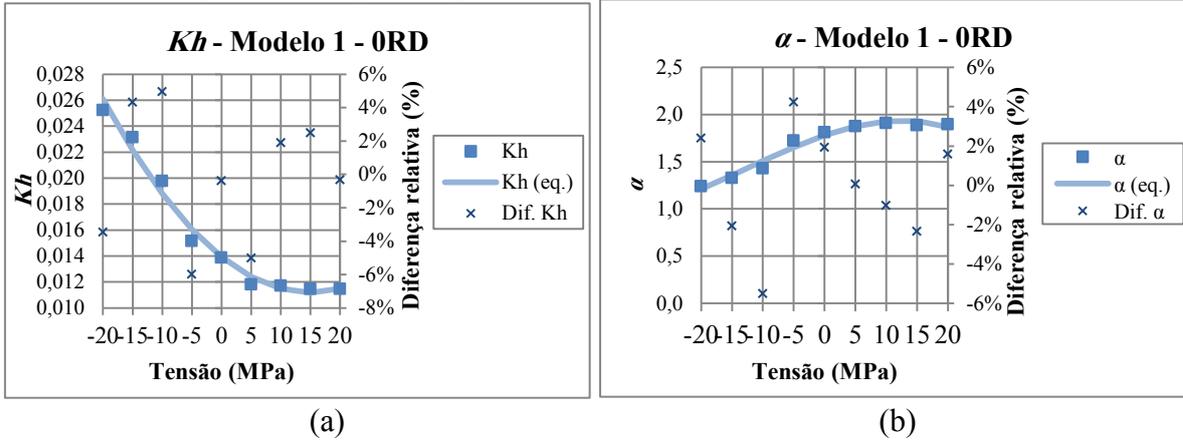
$$K_{h\ 90TD} = 7,4 E^{-6} \sigma^2 - 3,72 E^{-4} \sigma + 1,69 E^{-2} \quad (D.5)$$

$$\alpha_{90TD} = -2,23 E^{-5} \sigma^3 - 3,04 E^{-4} \sigma^2 + 2,46 E^{-2} \sigma + 1,722 \quad (D.6)$$

Nas figuras D.1, D.2 e D.3 são apresentados os valores dos parâmetros com suas respectivas curvas definidas pelas equações (D.1) a (D.6). Nestas figuras, os valores dos parâmetros do modelo 1 obtidos com a metodologia de separação de perdas empregada nesta dissertação são definidos pelos quadrados; as curvas em linhas contínuas representam os valores calculados através das equações polinomiais ((D.1) a (D.6)) e as cruces indicam as diferenças relativas entre os valores dos parâmetros obtidos com a metodologia de separação de perdas e pelas equações. Na Figura D.1(a) e na Figura D.1(b), são apresentados os resultados para os parâmetros K_h e α da amostra 0RD, respectivamente. As diferenças relativas entre os valores de K_h e de α obtidos pela separação de perdas e pela equação polinomial que descreve seu comportamento foram inferiores a 6% para a amostra 0RD. Na Figura D.2(a) e na Figura D.2(b), são apresentados os resultados para os parâmetros K_h e α da amostra 45D, respectivamente. As diferenças entre valores obtidos pela separação de perdas e pelo equacionamento polinomial para esta amostra (45DD) foram inferiores a 6% para K_h e 3% para α . Na Figura D.3(a) e na Figura D.3(b), são apresentados os resultados para os parâmetros K_h e α da amostra 90TD, respectivamente. As diferenças entre valores obtidos pela separação de perdas e pelo equacionamento polinomial da amostra 90TD foram inferiores a 7% para K_h e 6% para α .

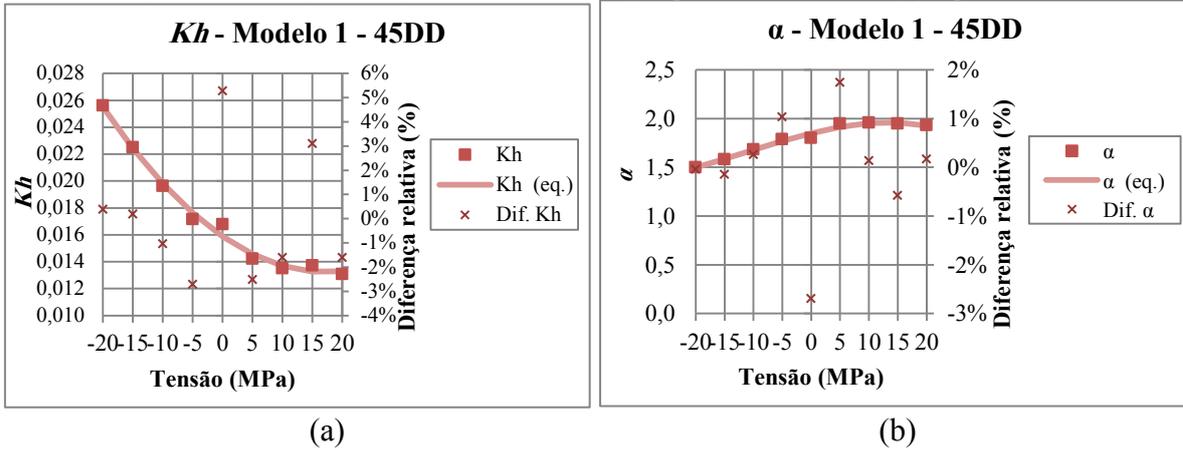
¹³ Para encontrar equações que representam os valores dos parâmetros, foi utilizada a ferramenta “curva de tendência” do Excel.

Figura D.1: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 0RD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α .



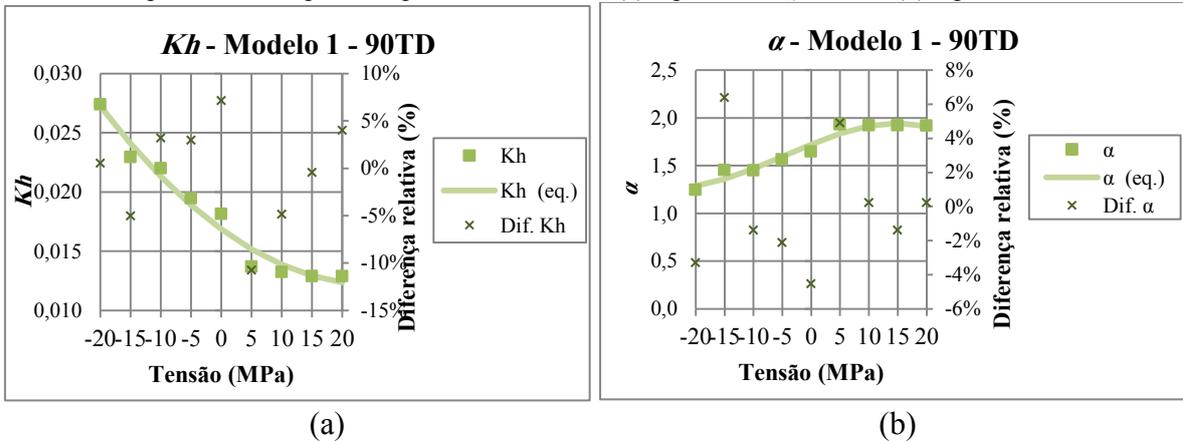
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura D.2: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α .



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura D.3: Valores dos parâmetros do modelo 1 para a amostra 90TD obtidos neste trabalho e representações dos seus comportamentos a partir de polinômios. A letra (a) representa K_h e a letra (b) representa α .



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos estudos encontrados na literatura, sabe-se que as representações encontradas através dos polinômios de terceira ordem (para K_h) e de segunda ordem (para α),

provavelmente não representaria bem estas amostras para esforços em níveis superiores a 20 MPa. Por exemplo, no estudo de Leuning (LEUNING et al., 2016) apresentado na Figura 3.7 do capítulo 3, viu-se que o coeficiente equivalente a K_h (nomenclatura utilizada nesta dissertação), possui valores próximos entre si até a faixa de 300 MPa de tração (resultados para amostras GNO). Citam-se também, os resultados de Saeed (SAEED, 2015) apresentados na Figura 3.8, onde para esforços de compressão até cerca de 20 MPa, teve-se um comportamento semelhante ao desta dissertação. Para esforços entre 20 MPa e 40 MPa, os valores de “ K_h ”, obtidos por Saeed, variam pouco (parecem até se comportar de maneira aproximadamente constante entre 30 MPa e 40 MPa). Assim, afirma-se que os modelos polinomiais que representam os comportamentos dos parâmetros encontrados de perdas por histerese (representados pelas equações e figuras desta seção) são válidos para as amostras e nos níveis de esforços aplicados no presente trabalho.

A fim de encontrar outros modelos que pudessem representar os comportamentos obtidos para K_h e para α do modelo 1 de perdas por histerese. Separaram-se os valores dos parâmetros nas seguintes faixas de esforços mecânicos (em MPa):

- $-20 \leq \sigma \leq -5$;
- $5 \leq \sigma \leq 20$;
- $-5 < \sigma < 5$;

Para cada faixa de esforços, escolheram-se diferentes aproximações. As aproximações foram as mesmas para cada tipo de coeficiente numa mesma faixa de tensões mecânicas. O equacionamento escolhido, nos níveis de 5 MPa a 20 MPa de compressão, para representar os valores de K_h e de α foi o logaritmo neperiano (equações (D.7) a (D.12)). Para representar os valores destes parâmetros nas demais faixas de esforços foi escolhida a aproximação linear. Entre os níveis de 5 MPa a 20 MPa de compressão as equações que representam K_h e α definidas pela numeração de (D.13) a (D.18) e entre 5 MPa de tração e 5MPa de tração pelas equações numeradas de (D.21) a (D.26). A fim de realizar uma verificação sobre a representatividade dos equacionamentos encontrados, são apresentados gráficos com os valores dos parâmetros do modelo 1 (para as três amostras 0RD, 45DD e 90TD). Nas seguintes figuras, os quadrados indicam os valores obtidos para K_h ou para α , a curva na linha contínua representa o valor do respectivo parâmetro calculado através de suas respectivas equações (variam segundo a faixa de esforço) e as cruzes indicam as diferenças relativas entre o valor calculado do parâmetro (através das equações) e o valor dos parâmetros (obtidos com a metodologia de separação de perdas empregada nesta dissertação). Na Figura D.4(a) são

apresentados os valores relativos a K_h da amostra 0RD, na Figura D.4(b) os valores relativos a K_h da amostra 45DD e na Figura D.4(c) os valores relativos a K_h da amostra 90TD. Observa-se nos três gráficos da Figura D.4 que através da função logaritmo neperiano (nos níveis de compressão), as curvas calculadas tendem a ter um aumento mais suavizado, conforme se aumentam os esforços mecânicos. Nestes mesmos gráficos da Figura D.4 observa-se que em tração, as curvas tendem a diminuir com uma pequena inclinação conforme se elevam os níveis de esforços. Na Figura D.4(b), percebe-se uma descontinuidade entre as curvas definidas para valores próximos ao ponto de -5 MPa. As diferenças relativas entre os valores obtidos de K_h pela metodologia de separação de perdas empregada neste trabalho e os valores calculados através do equacionamento proposto neste apêndice são relativamente pequenas. Os valores de diferenças foram inferiores a 3% na amostra 0RD, inferiores a 5 % na amostra 45DD e inferiores a 7% na amostra 90TD. Na Figura D.5 foi realizada uma análise utilizando uma abordagem, semelhante a da Figura D.4, para o parâmetro α . Na Figura D.5(a) são apresentados os valores referentes a α da amostra 0RD, na Figura D.5(b) os valores referentes a α da amostra 45DD e na Figura D.5(c) os valores referentes a α da amostra 90TD. Os valores de diferença relativa entre os valores obtidos de K_h pela metodologia de separação de perdas empregada neste trabalho, e os valores calculados através do equacionamento proposto neste apêndice, representam relativamente bem os pontos experimentais. Os valores de diferenças foram inferiores a 3% na amostra 0RD, inferiores a 3% na amostra 45DD e inferiores a 7% na amostra 90TD. Acredita-se que este pode ser um início de estudo para definir o equacionamento dos parâmetros de perdas como as de histerese, entretanto, considera-se imprescindível se ter ensaios em níveis mais elevados de esforços para melhorar estes equacionamentos (modelos).

$$K_{h\ 0RD} = 7,32 E^{-3} \ln(-\sigma) + 3,23E^{-3}; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.7})$$

$$K_{h\ 45DD} = 5,88 E^{-3} \ln(-\sigma) + 7,09E^{-3}; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.8})$$

$$K_{h\ 90TD} = 5,06 E^{-3} \ln(-\sigma) + 1,08E^{-2}; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.9})$$

$$\alpha_{0RD} = -3,49 E^{-1} \ln(-\sigma) + 2,269; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.10})$$

$$\alpha_{45DD} = -2,05 E^{-1} \ln(-\sigma) + 2,130; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.11})$$

$$\alpha_{90TD} = -1,92 E^{-1} \ln(-\sigma) + 1,889; \text{ para } -20 \leq \sigma \leq -5 \quad (\text{D.12})$$

$$K_{h\ 0RD} = -2,61 E^{-5} \sigma + 1,19 E^{-2}; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \quad (\text{D.13})$$

$$K_{h\ 45DD} = -6,4 E^{-5} \sigma + 1,44 E^{-2}; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \quad (\text{D.14})$$

$$K_{h\ 90TD} = -5,57 E^{-5} \sigma + 1,39 E^{-2}; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \quad (\text{D.15})$$

$$\alpha_{0RD} = 8,6 E^{-4} \sigma + 1,882 ; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \tag{D.16}$$

$$\alpha_{45DD} = -1,21 E^{-3} \sigma + 1,961 ; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \tag{D.17}$$

$$\alpha_{90TD} = -6,69 E^{-4} \sigma + 1,93 ; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \tag{D.18}$$

$$K_{h0RD} = -2,61 E^{-5} \sigma + 1,19 E^{-2} ; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \tag{D.19}$$

$$K_{h45DD} = -6,4 E^{-5} \sigma + 1,44 E^{-2} ; \text{ para } 5 \leq \sigma \leq 20 \tag{D.20}$$

$$K_{h0RD} = -3,34 E^{-4} \sigma + 1,36 E^{-2} ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.21}$$

$$K_{h45DD} = -2,95 E^{-4} \sigma + 1,6 E^{-2} ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.22}$$

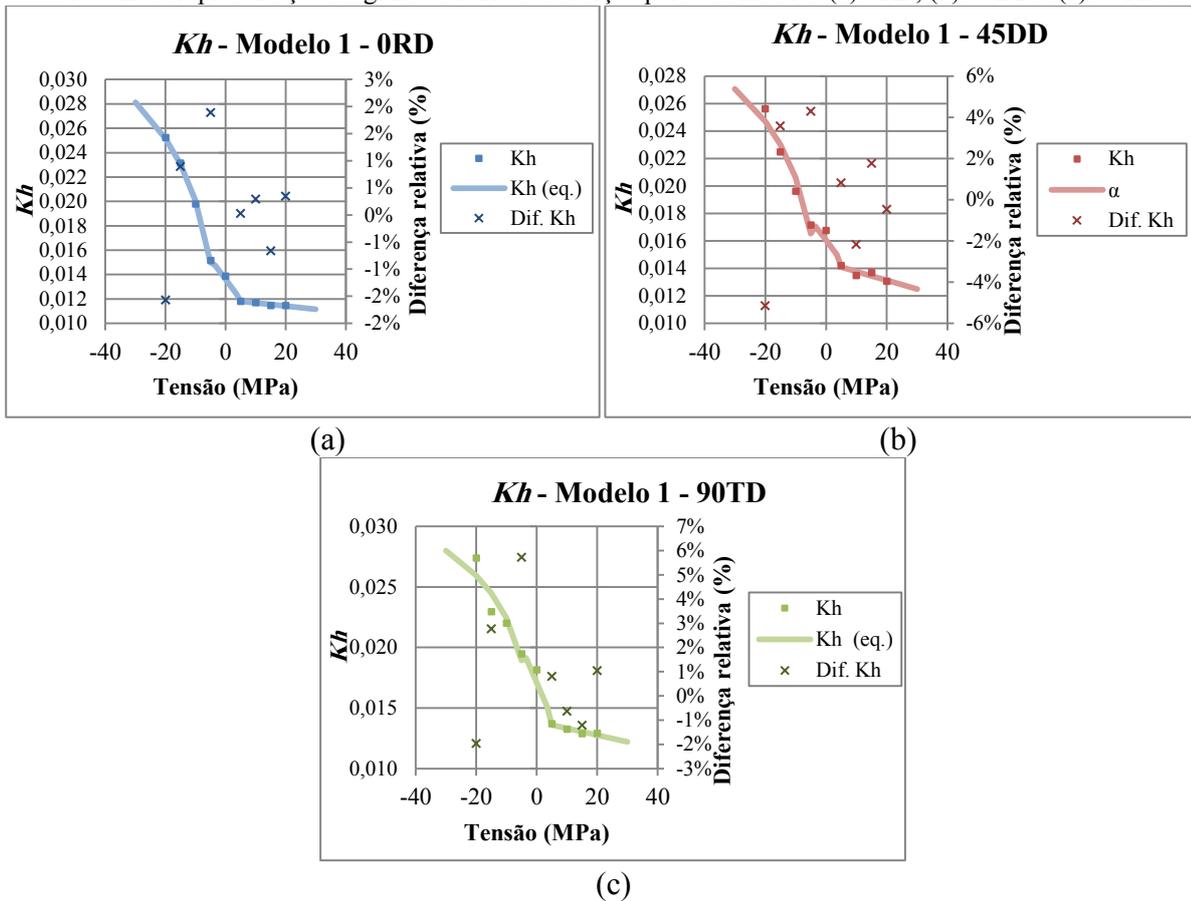
$$K_{h90TD} = -5,77 E^{-4} \sigma + 1,71 E^{-2} ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.23}$$

$$\alpha_{0RD} = 1,5 E^{-2} \sigma + 1,805 ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.24}$$

$$\alpha_{45DD} = 1,62 E^{-2} \sigma + 1,845 ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.25}$$

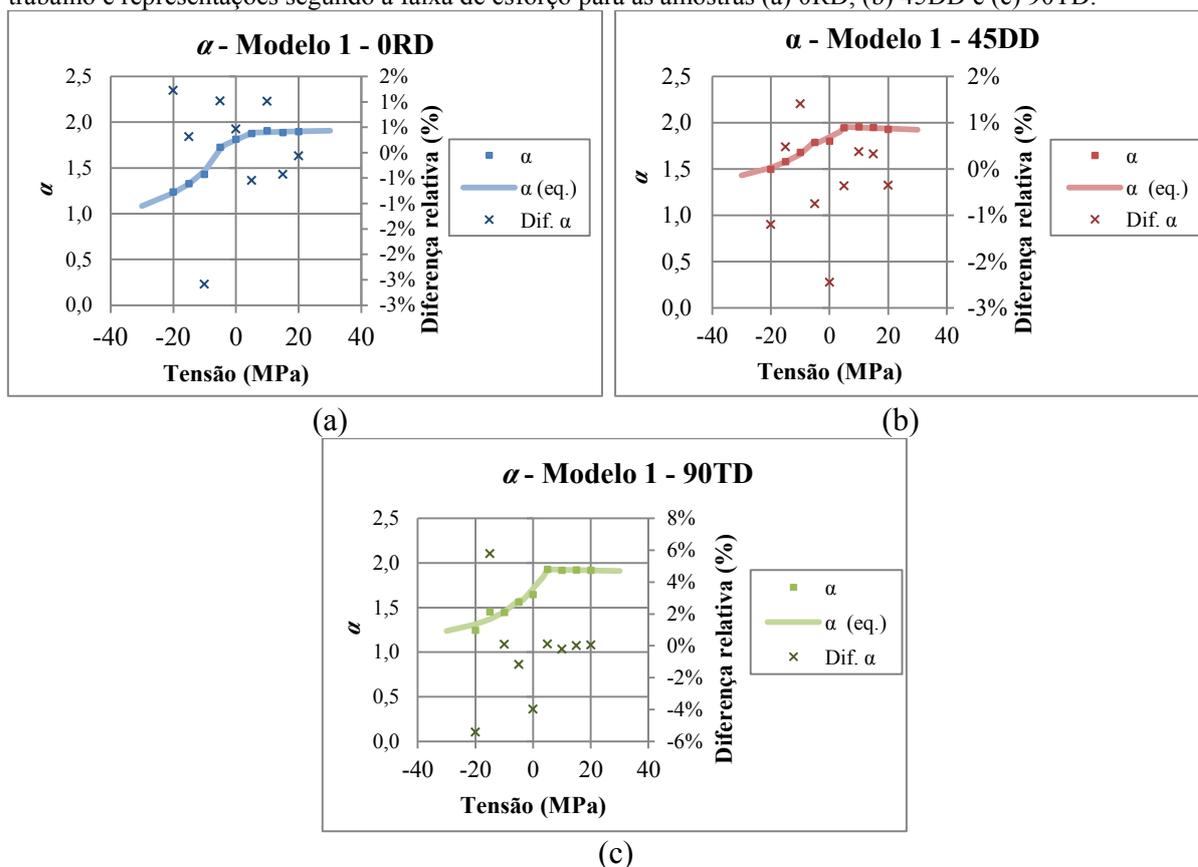
$$\alpha_{90TD} = 3,68 E^{-2} \sigma + 1,171 ; -5 < \sigma < 5 \tag{D.26}$$

Figura D.4: Valores dos parâmetros K_h do modelo 1 de perdas por histerese para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforços para as amostras (a) 0RD, (b) 45DD e (c) 90TD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura D.5: Valores dos parâmetros α do modelo 1 de perdas por histerese para a amostra 45DD obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforço para as amostras (a) 0RD, (b) 45DD e (c) 90TD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Análises semelhantes às apresentadas nessa seção (para representar o comportamento de K_h e α do modelo 1 de perdas por histerese), foram realizadas para outros modelos de perdas por histerese. Nas próximas seções, serão apresentadas equações que representam os comportamentos dos parâmetros dos modelos 2, 3 e 4 das perdas por histerese em função do esforço mecânico. Serão apresentadas apenas as equações encontradas através de funções polinomiais que representam bem o comportamento dos modelos dentro da faixa de esforços realizados neste trabalho. Como mencionado, para uma análise mais criteriosa, separando os esforços “em partes”, seria interessante avaliar os valores dos parâmetros em níveis mais elevados de esforços.

D.2. EQUACIONAMENTO DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DO MODELO 2 DE PERDAS POR HISTERESE

Foram encontradas equações que descrevem o comportamento dos parâmetros K_h , α_0 e α_1 do modelo 2 de representação das perdas por histerese para as amostras com três diferentes direções de corte. As equações de K_h são polinômios de segundo grau (equações “(D.27),

(D.28) e (D.29)” se referem as amostras de 0°, 45° e 90°, respectivamente) e as equações de α_0 e α_1 são equações de terceiro grau. As equações (D.30), (D.31) e (D.32) se referem aos parâmetros α_0 das amostras de 0°, 45° e 90°, respectivamente; e as equações (D.33), (D.34) e (D.35) se referem , respectivamente, aos parâmetros α_1 das amostras de 0°, 45° e 90°. Na Figura 4.8 são apresentados os valores dos parâmetros deste modelo 2 e suas respectivas curvas calculadas a partir das equações, bem como as diferenças relativas entre os valores dos parâmetros obtidos através da metodologia de separação de perdas empregada e o os valores obtidos com as equações polinomiais. Os valores do coeficiente K_h são apresentados na Figura 4.8(a), Figura 4.8(b) e Figura 4.8(c) e se referem às amostras 0RD, 45DD e 90 TD, respectivamente. Os valores do coeficiente α_0 são apresentados na Figura 4.8(d), Figura 4.8(e) e Figura 4.8(f) e referem-se às amostras 0RD, 45DD e 90 TD, respectivamente. A Figura 4.8(g), Figura 4.8(h) e Figura 4.8(i) correspondem aos valores do coeficiente α_1 das amostras 0RD, 45DD e 90 TD, respectivamente. As diferenças relativas entre os valores dos parâmetros obtidos pela metodologia empregada de separação de perdas e os valores obtidos pelas aplicações das equações polinomiais encontradas foram inferiores a 8% para o coeficiente K_h , inferiores a 6% e para o parâmetro α_0 . As diferenças foram significativas em alguns níveis de esforço para o parâmetro α_1 , tais como para os casos da amostra 0RD em 10 MPa e 15MPa de compressão (44% e 135%, respectivamente), na amostra 45DD em 15 MPa de compressão (99%) e na amostra 90TD em 15 MPa de compressão (66%).

$$K_{h_{0RD}} = 1,29 E^{-5} \sigma^2 - 3,766 E^{-4} \sigma + 1,35 E^{-2} \quad (D.27)$$

$$K_{h_{45DD}} = 9,6 E^{-6} \sigma^2 - 3,18 E^{-4} \sigma + 1,53 E^{-2} \quad (D.28)$$

$$K_{h_{90TD}} = 8 E^{-6} \sigma^2 - 3,84 E^{-4} \sigma + 1,64 E^{-2} \quad (D.29)$$

$$\alpha_{0_{0RD}} = 1,73 E^{-5} \sigma^3 - 7,85 E^{-5} \sigma^2 - 1,15 E^{-3} \sigma + 1,381 \quad (D.30)$$

$$\alpha_{0_{45DD}} = 5 E^{-6} \sigma^3 + 1,09 E^{-4} \sigma^2 - 4,5 E^{-3} \sigma + 1,427 \quad (D.31)$$

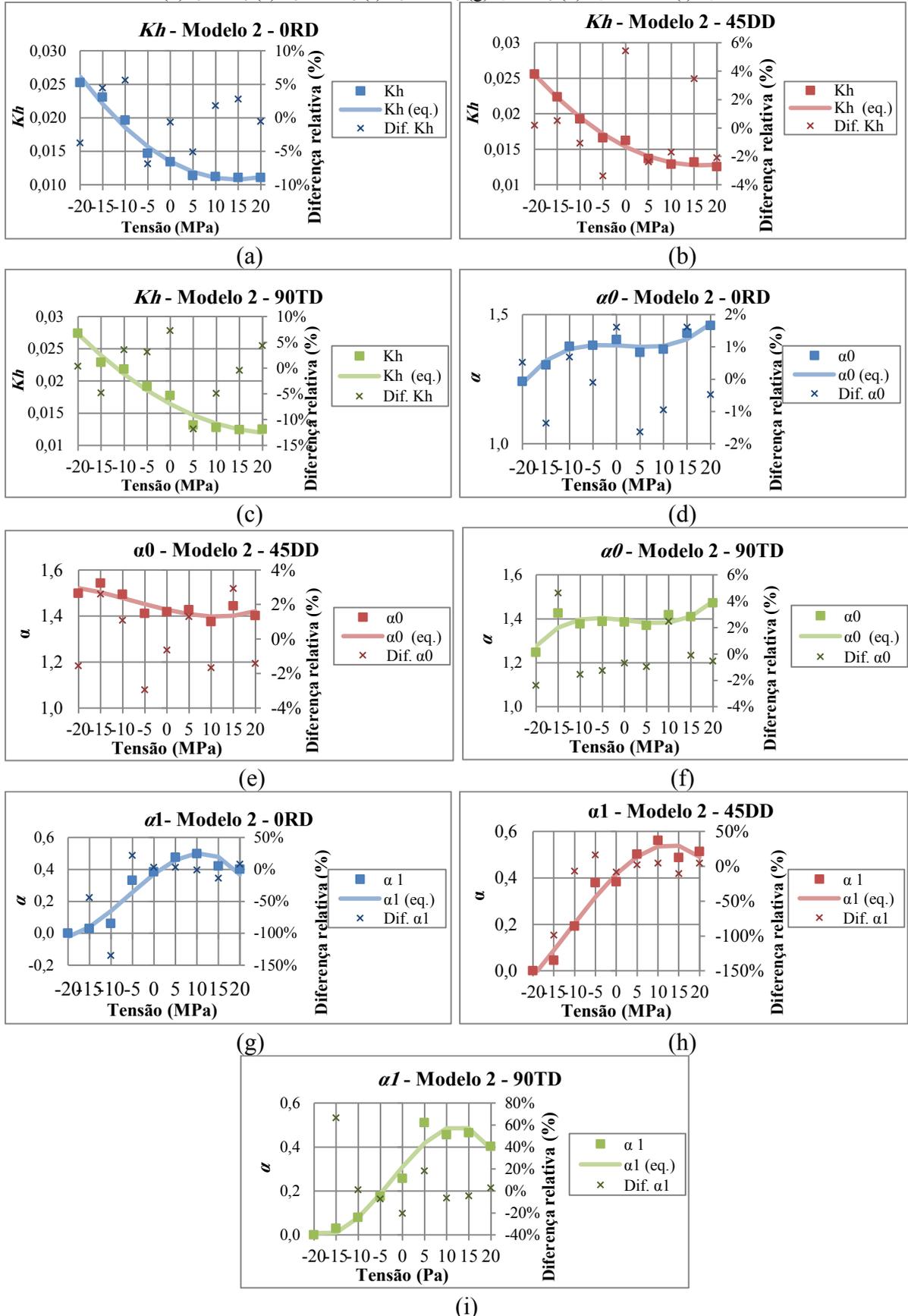
$$\alpha_{0_{90TD}} = 1,95 E^{-5} \sigma^3 - 4,04 E^{-5} \sigma^2 - 2,71 E^{-2} \sigma + 1,394 \quad (D.32)$$

$$\alpha_{1_{0RD}} = -2,78 E^{-5} \sigma^3 - 4,95 E^{-4} \sigma^2 - 2,09 E^{-2} \sigma + 3,71 E^{-1} \quad (D.33)$$

$$\alpha_{1_{45DD}} = -1,23 E^{-5} \sigma^3 - 4,57 E^{-4} \sigma^2 - 1,78 E^{-2} \sigma + 4,16 E^{-1} \quad (D.34)$$

$$\alpha_{1_{90TD}} = -3,58 E^{-5} \sigma^3 - 2,75 E^{-4} \sigma^2 - 2,39 E^{-2} \sigma + 3,1 E^{-1} \quad (D.35)$$

Figura 4.8: Valores dos parâmetros do modelo 2 de perdas por histerese para as três amostras obtidos neste trabalho e representações segundo a faixa de esforço para as amostras (a) K_h 0RD, (b) K_h 45DD, (c) K_h 90TD, (d) α_0 0RD, (e) α_0 45DD, (f) α_0 90TD, (g) α_1 0RD, (h) α_1 45DD e (i) α_1 90TD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019)

D.3. EQUACIONAMENTO DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DO MODELO 3 DE PERDAS POR HISTERESE

Os resultados dos equacionamentos dos parâmetros dos modelos 3 e 4 são semelhantes aos realizados para o modelo 2. Uma vez que os comportamentos dos parâmetros em função do esforço mecânico também são similares, com exceção do parâmetro α_1 que no modelo 3 é nulo para todos os níveis de tensões. No modelo 4, os valores dos parâmetros α_1 e α_2 são nulos para todos os níveis de tensões.

As equações que descrevem o comportamento dos parâmetros K_h , α_0 e α_2 do modelo 3 de representação das perdas por histerese em função do esforço mecânico para as amostras com três diferentes direções são as equações de (D.36) a (D.44). As equações (D.36), (D.37) e (D.38) são polinômios de segundo grau que representam o coeficiente K_h das amostras de 0°, 45° e 90°, respectivamente), as equações (D.39), (D.40) e (D.41) são equações de terceiro grau que representam o comportamento do parâmetro α_0 e as equações (D.42), (D.43) e (D.44) (também de terceiro grau) representam o comportamento de α_2 .

$$K_{h\ 0RD} = 1,29 E^{-5} \sigma^2 - 3,747 E^{-4} \sigma + 1,35 E^{-2} \quad (D.36)$$

$$K_{h\ 45DD} = 9,6 E^{-6} \sigma^2 - 3,19 E^{-4} \sigma + 1,53 E^{-2} \quad (D.37)$$

$$K_{h\ 90TD} = 8,1 E^{-6} \sigma^2 - 3,83 E^{-4} \sigma + 1,64 E^{-2} \quad (D.38)$$

$$\alpha_{0\ 0RD} = 6,7 E^{-6} \sigma^3 - 2,162 E^{-4} \sigma^2 + 6,49 E^{-3} \sigma + 1,493 \quad (D.39)$$

$$\alpha_{0\ 45DD} = 2 E^{-6} \sigma^3 - 3,01 E^{-5} \sigma^2 + 1,44 E^{-3} \sigma + 1,556 \quad (D.40)$$

$$\alpha_{0\ 90TD} = 6,3 E^{-6} \sigma^3 - 9,29 E^{-5} \sigma^2 + 6,05 E^{-3} \sigma + 1,487 \quad (D.41)$$

$$\alpha_{2\ 0RD} = -1,32 E^{-5} \sigma^3 - 2,88 E^{-4} \sigma^2 + 1,4 E^{-2} \sigma + 2,09 E^{-1} \quad (D.42)$$

$$\alpha_{2\ 45DD} = -5,9 E^{-6} \sigma^3 - 2,65 E^{-4} \sigma^2 - 9,7 E^{-3} \sigma + 2,38 E^{-1} \quad (D.43)$$

$$\alpha_{2\ 90TD} = -1,76 E^{-5} \sigma^3 - 1,79 E^{-4} \sigma^2 + 1,2 E^{-2} \sigma + 1,76 E^{-1} \quad (D.44)$$

D.4. EQUACIONAMENTO DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DO MODELO 4 DE PERDAS POR HISTERESE

Como dito anteriormente, os resultados dos equacionamentos dos parâmetros do modelo 4 são semelhantes aos realizados para o modelo 2 (também para o modelo 3). Os valores dos parâmetros α_1 e α_2 do modelo 4 são nulos para todos os níveis de tensões.

Nesta seção, são apresentadas as equações que descrevem o comportamento dos parâmetros K_h , α_0 e α_2 do modelo 3 de representação das perdas por histerese em função da tensão mecânica para as amostras com três diferentes direções são as equações de (D.45) a

(D.53). As equações (D.45), (D.46) e (D.47) são polinômios de segundo grau que representam o coeficiente K_h das amostras de 0° , 45° e 90° , respectivamente) e as equações (D.48), (D.49) e (D.50) são equações de terceiro grau que representam o comportamento do parâmetro α_0 e as equações também de terceiro grau (D.51), (D.52) e (D.53) representam o comportamento de α_2 .

$$K_{h\ 0RD} = 1,29 E^{-5} \sigma^2 - 3,73 E^{-4} \sigma + 1,35 E^{-2} \quad (D.45)$$

$$K_{h\ 45DD} = 9,6 E^{-6} \sigma^2 - 3,18 E^{-4} \sigma + 1,53 E^{-2} \quad (D.46)$$

$$K_{h\ 90TD} = 8,1 E^{-6} \sigma^2 - 3,81 E^{-4} \sigma + 1,64 E^{-2} \quad (D.47)$$

$$\alpha_{0\ 0RD} = 2,5 E^{-6} \sigma^3 - 2,68 E^{-4} \sigma^2 + 9,43 E^{-3} \sigma + 1,535 \quad (D.48)$$

$$\alpha_{0\ 45DD} = -1,9 E^{-6} \sigma^3 - 8,16 E^{-5} \sigma^2 + 3,77 E^{-3} \sigma + 1,605 \quad (D.49)$$

$$\alpha_{0\ 90TD} = 9 E^{-7} \sigma^3 - 1,1 E^{-4} \sigma^2 + 9,53 E^{-3} \sigma + 1,522 \quad (D.50)$$

$$\alpha_{3\ 0RD} = -7 E^{-6} \sigma^3 - 1,817 E^{-4} \sigma^2 + 5,88 E^{-4} \sigma + 1,30 E^{-1} \quad (D.51)$$

$$\alpha_{3\ 45DD} = -3,1 E^{-6} \sigma^3 - 1,69 E^{-4} \sigma^2 - 5,87 E^{-3} \sigma + 1,51 E^{-1} \quad (D.52)$$

$$\alpha_{3\ 90TD} = -9,6 E^{-6} \sigma^3 - 1,21 E^{-4} \sigma^2 + 6,75 E^{-3} \sigma + 1,1 E^{-1} \quad (D.53)$$

D.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se, neste apêndice, uma discussão sobre equações (modelos) que podem descrever os comportamentos dos parâmetros dos modelos de separação de perdas por histerese. Foram definidas equações polinomiais de segunda e terceira ordem que representam satisfatoriamente os parâmetros dos modelos 1, 2, 3 e 4 das perdas por histerese (o modelo 1 é o modelo de Steinmetz, e os outros três são derivações do modelo 1) nos níveis de esforços aplicados neste trabalho (sem esforços, 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa em tração e em compressão).

Sabe-se que as equações, em função da tensão mecânico σ , encontradas possivelmente não representarão bem outros níveis de esforços (superiores aos aplicados neste trabalho), pois equações polinomiais de segunda e de terceira ordem têm elevações muito acentuadas conforme se aumentam os valores das variáveis. Esse comportamento extremamente acentuado, não condiz com resultados da literatura ((LEUNING et al., 2016) e (SAEED, 2015), por exemplo). Assim, realizou-se uma representação (preliminar) a partir dos valores dos parâmetros encontrados neste trabalho. Dividiram-se os resultados (valores de parâmetros em função do esforço do modelo 1 de separação de perdas por histerese) em três faixas de níveis de tensão mecânica: 5 MPa a 20 MPa de compressão, 5 MPa a 20 MPa de tração e entre 5 MPa de compressão e 5 MPa de tração. Para a faixa com níveis de 5 MPa a 20 MPa de compressão, os valores de K_h e α puderam ser representados por expressões logarítmicas

(logaritmo neperiano). Para faixas de esforços entre 5 MPa de compressão e 5 MPa de tração, bem como nos níveis de 5 MPa a 20 MPa de tração, pode-se representar os valores dos parâmetros por equações lineares (cada faixa teve uma equação linear diferente).

Entende-se que os equacionamentos encontrados, apesar de preliminares, podem ser considerados contribuições importantes para o desenvolvimento de outras pesquisas (e/ou aplicações) que envolvem o tema de determinação de parâmetros de modelos de perdas magnéticas em função de esforços mecânicos.