



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

Rodrigo de Araújo de Miranda

**Implementação computacional do cálculo de perdas por histerese corrigido  
pelo acoplamento magnetomecânico**

Florianópolis  
2021

Rodrigo de Araújo de Miranda

**Implementação computacional do cálculo de perdas por histerese corrigido  
pelo acoplamento magnetomecânico**

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

Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Coorientador: Prof. Laurent Didier Bernard, Dr.

Florianópolis

2021

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

Miranda, Rodrigo de Araújo de  
Implementação computacional do cálculo de perdas por  
histerese corrigido pelo acoplamento magnetomecânico /  
Rodrigo de Araújo de Miranda ; orientador, Nelson  
Sadowski, coorientador, Laurent Didier Bernard, 2021.  
89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Acoplamento magnetomecânico.  
3. Perdas por histerese. 4. Implementação computacional. 5.  
Método dos elementos finitos. I. Sadowski, Nelson. II.  
Bernard, Laurent Didier. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica. IV. Título.

Rodrigo de Araújo de Miranda

**Implementação computacional do cálculo de perdas por histerese corrigido  
pelo acoplamento magnetomecânico**

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

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Laurent Daniel, Dr.  
CentraleSupélec

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. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 28 de Abril de 2021.

Este trabalho é dedicado a Arthur Costa Santana.

## AGRADECIMENTOS

Em um ano conturbado, em que tantas luzes foram apagadas de maneira tão repentina, agradeço primeiro a Deus por não ter levado o brilho de nenhum dos meus familiares e amigos próximos.

Agradeço aos meus pais, Mário e Gisélia, por todos os sacrifícios que aceitaram para garantir que eu pudesse ter todas as condições de escolher o que queria ser e como o seria.

Agradeço também a toda a minha família por sempre estar presente em meus pensamentos e em minha vida. Aos meus padrinhos, Kaio, Eilany e Ademir, obrigado por sempre acreditarem no afilhado de vocês. Essa é uma dívida que não me vejo capaz de pagar.

Agradeço ao meu grande amigo, Roberto de Souza Salgado, por sempre me brindar com sua sabedoria e simplicidade em todas as conversas, presenciais e telefônicas, que trocamos desde 2017 até hoje.

Aos meus orientadores, Professores Nelson Sadowski e Laurent Bernard, agradeço pela disposição em orientarem essa dissertação e também por todas as nossas reuniões que, embora remotas, sempre pareceram presenciais. Ao Professor Nelson, sou extremamente grato pela confiança que teve em minha capacidade de executar esse trabalho. Ao Professor Laurent, obrigado por toda a ajuda no entendimento dos conceitos da área da mecânica e suas simulações.

Agradeço ao Benjamin e à Indiara, por terem iniciado e dado sequência na linha de pesquisa no GRUCAD, gerando todo o conhecimento e conjunto de resultados experimentais que tornaram esse trabalho possível.

Aos Professores Nelson Jhoe Batistela, Patrick Kuo-Peng e Laurent Daniel, agradeço por terem aceitado o convite para compor a banca examinadora desse trabalho e por proporcionarem suas contribuições.

Agradeço aos meus grandes amigos, Gabriel, Julio, Mirella e Vinícius, e muitos outros, por estarem sempre dispostos a conviver e aceitar o meu jeito peculiar de ser e agir. À Letícia Vinhal, agradeço por, mesmo de longe e após alguns anos, ainda continuar supervisionando e corrigindo minhas atitudes. À Bruna Valença, sou feliz e grato pelo retorno dela ao meu círculo de amizades e por todas as conversas que me permitem ter outros olhares para a vida.

Agradeço ao amigo Cristhian Becker por todos os almoços e por todas as conversas e risadas. Ao amigo Cristian Mazzola, obrigado por ter sido minha dupla nos cafés feitos aos finais de semana no GRUCAD, na reta final desse trabalho. Agradeço ao Professor Patrick Kuo-Peng por nunca ter permitido que eu não me divertisse em um dia normal de atividades no GRUCAD.

Agradeço ao Instrutor Kauê e todos meus amigos da família Krav Maga Carvoeira por terem me proporcionado diversas risadas e aprendizados nos últimos 4 meses.

Aos demais professores e amigos do GRUCAD e do LAESP, agradeço por proporcionarem um ambiente agradável e divertido de trabalho e por sempre estarem dispostos a ajudar e fornecer conselhos.

Aos funcionários do PPGEEL, Lis, Marcelo e Wilson, agradeço por toda a disposição e bom humor em auxiliar com os procedimentos administrativos e burocráticos, desde o começo do mestrado até a solicitação da defesa.

À Capes pelo auxílio financeiro, concedido em forma de bolsa de estudos, durante o período do mestrado.

Finalmente, agradeço a um menino de 6 anos, chamado Rodrigo, pela decisão de nunca mais tentar provar que estava certo, mas sim provar que aqueles que confiavam nele não estavam errados. O meu mundo jamais foi o mesmo depois disso. Obrigado, tudo ainda continua sendo por você.

*"With great power comes great responsibility."  
(Uncle Ben - Spider-Man, 2002)*

*"What we do in life echoes in eternity."  
(Maximus - Gladiator, 2000)*

*"The impediment to action advances action.  
What stands in the way becomes the way."  
(Marcus Aurelius, 170)*

## RESUMO

O trabalho tem como objetivo continuar uma linha de pesquisa estabelecida no laboratório GRUCAD acerca do acoplamento magnetomecânico na análise de dispositivos eletromagnéticos. A partir de dados experimentais obtidos em pesquisas anteriores, uma modelagem de funções contínuas que descrevem o comportamento dos parâmetros de um modelo de perdas por histerese de acordo com os esforços mecânicos é proposta, com a obtenção das constantes apropriadas. Uma simulação mecânica de um dispositivo de estudo é elaborada e realizada através de um *software* multi-físico que faz uso do método de elementos finitos, o GetDP, de modo a obter as distribuições de estresses radiais e tangenciais ao longo do equipamento. Uma implementação computacional do acoplamento magnetomecânico é proposta e adicionada ao programa de simulação eletromagnética de referência do GRUCAD, o EFCAD, fazendo uso das funções modeladas e dos resultados de simulações mecânicas para efetuar uma correção no cálculo das perdas por histerese, de acordo com uma distribuição de estresses equivalentes obtida. A implementação é validada através de simulações magnéticas distintas que contém características particulares, como efeitos de não-linearidade e presença de harmônicos na forma de onda da excitação do dispositivo. Uma discussão dos resultados numéricos e gráficos obtidos e do desempenho da implementação proposta é realizada. Um conjunto de resultados adicionais de simulações é apresentado posteriormente no Apêndice do trabalho.

**Palavras-chave:** Acoplamento magnetomecânico. Perdas por histerese. Implementação computacional. Método dos elementos finitos.

## ABSTRACT

This work aims to provide a continuation to the research line established at the GRUCAD group regarding the magnetomechanical coupling in analysis of electromagnetic devices. From experimental data obtained in previous researches, a continuous functions modelling is performed, in order to describe the behavior of parameters in hysteresis losses models face the mechanical stresses, obtaining the appropriate constants. A mechanical simulation considering a study device is proposed and performed using a multi-physics software based on the finite element method, GetDP, in order to obtain the radial and tangential stresses distributions throughout the equipment. A computational implementation of the magnetomechanical coupling is proposed and added to GRUCAD's reference electromagnetic simulation program, EFCAD, making use of the modeled functions and the mechanical simulations results to adjust the computation of hysteresis losses, according to an obtained equivalent stresses distribution. The implementation is validated through different magnetic simulations that contain specific characteristics, such as nonlinearity effects and the presence of harmonic components in the excitation waveform of the device. A discussion of the obtained numerical and graphical results and the performance of the proposed implementation is elaborated. A set of additional simulation results is presented in the Appendix of the work.

**Keywords:** Magnetomechanical coupling. Hysteresis losses. Computational implementation. Finite element method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes das perdas magnéticas em função da frequência. . .	24
Figura 2 – Lâmina de aço elétrico exposta a uma indução magnética $B$ na direção $x$ . . . . .	26
Figura 3 – Fenômeno da magnetostricção sobre uma barra de material ferromagnético. . . . .	29
Figura 4 – Curva de magnetostricção $\lambda$ em função do campo magnético $H$ para o níquel e 68 Permalloy. . . . .	30
Figura 5 – Variação das curvas de magnetizações para materiais com magnetostricções distintas. . . . .	31
Figura 6 – Resultados de ensaios e simulação de magnetização para amostra de Fe-Si sujeita a esforços de tração e compressão. . . . .	32
Figura 7 – Curva de magnetização experimental para material submetido a esforços de tração e de compressão de 55 MPa. . . . .	33
Figura 8 – Resultados de simulação para motor de relutância obtidos por Bernard, Mininger <i>et al.</i> (2011). . . . .	34
Figura 9 – Distribuição de perdas no ferro (a) desprezando efeito de <i>shrink fitting</i> e (b) considerando o efeito. . . . .	35
Figura 10 – Impacto do <i>shrink fitting</i> em um motor de relutância - tensões. . . .	36
Figura 11 – Impacto do <i>shrink fitting</i> em um motor de relutância - perdas por histerese. . . . .	36
Figura 12 – Variação dos parâmetros de um modelo de perdas para esforços de compressão de 0 MPa até 40 MPa e indução magnética de 1 T. . . .	38
Figura 13 – Variação dos coeficientes de um modelo de perdas para esforços de tração de 0 MPa até 100 MPa. . . . .	39
Figura 14 – Comportamento de parâmetros de modelo de perdas para amostras com duas direções de corte diferentes. . . . .	40
Figura 15 – Evolução dos fatores $C_h$ e $C_e$ segundo o nível de esforço mecânico $\sigma_{eq}$ . . .	41
Figura 16 – Alteração percentual nas perdas magnéticas devido a aplicação de tensões de tração e de compressão. . . . .	42
Figura 17 – Etapas originais para o cálculo das perdas por histerese no EFCAD. . . .	45
Figura 18 – Etapa de obtenção do conjunto $[g_k(\sigma)]$ , a partir dos resultados experimentais de Da Silva (2019). . . . .	45
Figura 19 – Obtenção do conjunto $[\sigma_i]$ , via simulação mecânica com GetDP e Gmsh. . . . .	46
Figura 20 – Procedimento para obtenção do conjunto $[\sigma_{eq,i}]$ . . . . .	47
Figura 21 – Cálculo das perdas por histerese corrigidas $W'_{h,i}$ . . . . .	47

Figura 22 – Dados experimentais dos parâmetros do modelo de perdas por histerese obtidos por Da Silva (2019). . . . .	49
Figura 23 – Traçado das funções $g_k(\sigma)$ com os coeficientes obtidos via ajuste de curvas. . . . .	51
Figura 24 – Modelo de perdas por histerese ajustado pelos parâmetros dependentes do esforço mecânico. . . . .	52
Figura 25 – Dispositivo <i>core tester</i> , desenvolvido no GRUCAD. . . . .	53
Figura 26 – Malha de elementos finitos do <i>core tester</i> , importada no GetDP. . . . .	55
Figura 27 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{rr}$ . . . . .	57
Figura 28 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{\theta\theta}$ . . . . .	57
Figura 29 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{r\theta}$ . . . . .	58
Figura 30 – Comparação de perdas considerando o cálculo sem campos rotativos e com campos rotativos. . . . .	59
Figura 31 – Distribuição das linhas de fluxo magnético em $t = 0.12$ s. . . . .	62
Figura 32 – Indução tangencial $B_t(t)$ em um elemento do estator do <i>core tester</i> . . . . .	63
Figura 33 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	64
Figura 34 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	64
Figura 35 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	66
Figura 36 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	66
Figura 37 – Alimentação composta de harmônicos proposta. . . . .	68
Figura 38 – Fluxo magnético composto de harmônicos idealizado. . . . .	69
Figura 39 – Indução tangencial $B_t(t)$ em um elemento do estator do <i>core tester</i> . . . . .	69
Figura 40 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	70
Figura 41 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	70
Figura 42 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	72
Figura 43 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	72
Figura 44 – Indução tangencial $B_t(t)$ em um elemento do estator do <i>core tester</i> . . . . .	73
Figura 45 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	74
Figura 46 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	75

Figura 47 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH). . . . .	76
Figura 48 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	76
Figura 49 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{rr}$ (Caso Fy). . . . .	83
Figura 50 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{\theta\theta}$ (Caso Fy). . . . .	84
Figura 51 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{rr}$ (Caso Fx+Fy). . . . .	84
Figura 52 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços $\sigma_{\theta\theta}$ (Caso Fx+Fy). . . . .	85
Figura 53 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	86
Figura 54 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	87
Figura 55 – Distribuição dos estresses equivalentes $\sigma_{eq,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	87
Figura 56 – Distribuição da diferença de perdas por histerese $\Delta W_{h,i}$ nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H). . . . .	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos coeficientes $c_j$ e coeficiente de determinação $r^2$ obtido para as funções $g_k(\sigma)$ via ajuste de curvas. . . . .	50
Tabela 2 – Características do dispositivo <i>core tester</i> . . . . .	60
Tabela 3 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso linear com alimentação senoidal. . . . .	65
Tabela 4 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso linear com alimentação composta de harmônicos. . . . .	71
Tabela 5 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso não-linear com alimentação senoidal. . . . .	75
Tabela 6 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso $F_y$ . . . . .	86
Tabela 7 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso $F_x+F_y$ . . . . .	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSN	Módulo de Visualização Gráfica do EFCAD
EFCAD	<i>Electromagnetic Fields Computer Aided Design</i>
EFCM	<i>Solver</i> Transiente com Dinâmica de Movimento do EFCAD
EFCS	<i>Solver</i> Estático do EFCAD
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada Rápida de Fourier
GetDP	<i>General Environment for the Treatment of Discrete Problems</i>
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
MEF	Método dos Elementos Finitos
MESH	Módulo de Visualização de Arquivo de Malha do EFCAD
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

$b_r$	Indução magnética remanente [T]
$B$	Indução magnética [T]
$B_p$	Indução magnética de pico [T]
$B_r$	Indução magnética radial [T]
$B_t$	Indução magnética tangencial [T]
$c_j$	Coeficientes do modelo de função para representação dos parâmetros do modelo de perdas frente aos esforços mecânicos
$d$	Espessura da lâmina [m]
$f$	Frequência [Hz]
$f_0$	Frequência de ensaio [Hz]
Fe	Ferro
$g_k$	Modelo de funções para representação dos parâmetros do modelo de perdas frente aos esforços mecânicos
$G$	Constante do cálculo das perdas excedentes
GNO	Grão não-orientado
$H$	Campo magnético [A/m]
$H_c$	Campo coercitivo [A/m]
$i$	Corrente de excitação [A]
$K_c$	Constante de perdas por correntes de Foucault do modelo de Steinmetz
$K_{exc}$	Constante de perdas excedentes do modelo de Bertotti
$K_h$	Constante de perdas por histerese do modelo de Steinmetz
$L$	Comprimento do material [m]
$L_1$	Indutância da bobina 1 do enrolamento primário [H]
$L_2$	Indutância da bobina 2 do enrolamento primário [H]
$m_v$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]

$M$	Indutância mútua entre bobina 1 e bobina 2 do enrolamento primário [H]
$M$	Magnetização [A/m]
$M_S$	Magnetização de saturação [A/m]
$n_0$	Número de objetos magnéticos ativos no estado quase estático
Ni	Níquel
$P_c$	Perdas clássicas [W] ou [J]
$P_{exc}$	Perdas excedentes [W] ou [J]
$P_h$	Perdas por histerese [W] ou [J]
$r^2$	Coeficiente de determinação
$R_1$	Resistência da bobina 1 do enrolamento primário [ $\Omega$ ]
$R_2$	Resistência da bobina 2 do enrolamento primário [ $\Omega$ ]
Si	Silício
$t$	Tempo [s]
T	Período [T]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$V_0$	Campo magnético que rege o aumento de objetos magnéticos [A/m]
$V_1$	Tensão de alimentação do enrolamento primário 1 [V]
$V_2$	Tensão de alimentação do enrolamento primário 2 [V]
$W_T$	Perdas energéticas totais [J/kg ou J/m <sup>3</sup> ]
$W_c$	Parcela de perdas referente às perdas clássicas [J/kg ou J/m <sup>3</sup> ]
$W_{exc}$	Parcela de perdas referente às perdas excedentes [J/kg ou J/m <sup>3</sup> ]
$W_h$	Parcela de perdas referente às perdas por histerese [J/kg ou J/m <sup>3</sup> ]
$W_h^0$	Perdas por histerese calculadas em condição livre de esforços mecânicos ( <i>stressless</i> ) [W/m]
$W'_h$	Perdas por histerese calculadas levando em consideração o efeito do acoplamento magnetomecânico [W/m]

$\Delta L$	Variação no comprimento do material [m]
$\Delta W_h$	Diferença percentual entre $W_h^0$ e $W_h'$ , tendo $W_h^0$ como referência [%]
$\lambda$	Magnetostricção
$\lambda_s$	Magnetostricção de saturação
$\lambda_t$	Magnetostricção transversa
$\mu$	Permeabilidade magnética [H/m]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar (no vácuo) [H/m]
$\rho$	Densidade superficial de força [N/m <sup>2</sup> ou Pa]
$\rho'$	Densidade superficial de força ajustada [N/m <sup>2</sup> ou Pa]
$\sigma$	Tensão mecânica [Pa]
$\sigma_e$	Condutividade elétrica [S/m]
$\sigma_{eq}$	Estresse equivalente [Pa]
$\sigma_{eq,max}$	Estresse equivalente máximo [Pa]
$\sigma_{rr}$	Componente radial da tensão mecânica [Pa]
$\sigma_{r\theta}$	Componente radial projetada na direção tangencial da tensão mecânica [Pa]
$\sigma_{\theta\theta}$	Componente tangencial da tensão mecânica [Pa]
$\tau$	Constante de tempos [s]
$\phi$	Fluxo magnético [Wb]
$\phi_1$	Harmônico fundamental da forma de onda do fluxo magnético [Wb]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E POSICIONAMENTO DO PROBLEMA	20
1.2	OBJETIVOS	21
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>21</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>21</b>
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	PERDAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE AÇO PARA FINS ELÉTRICOS	23
2.2	PERDAS POR HISTERESE	25
2.3	PERDAS CLÁSSICAS	26
2.4	PERDAS EXCEDENTES	27
2.5	INFLUÊNCIAS DE CARREGAMENTOS MECÂNICOS - O ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO	28
<b>2.5.1</b>	<b>Magnetostricção</b>	<b>28</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Magnetostricção inversa</b>	<b>29</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Magnetostricção positiva e magnetostricção negativa</b>	<b>30</b>
2.6	ESTUDOS DE ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	33
2.7	MODIFICAÇÃO NOS MODELOS DE PERDAS MAGNÉTICAS EM VIRTUDE DE CARREGAMENTOS MECÂNICOS	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EMPREGADA E GERAÇÃO DOS PRINCIPAIS SUBSÍDIOS</b>	<b>44</b>
3.1	METODOLOGIA PARA CORREÇÃO DO CÁLCULO DAS PERDAS POR HISTERESE NO EFCAD	44
3.2	ETAPA I - AJUSTE DE CURVAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	47
3.3	ETAPA II - MODELO MECÂNICO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	52
<b>3.3.1</b>	<b>Dispositivo de estudo: <i>Core Tester</i></b>	<b>53</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Modelo de simulação mecânica</b>	<b>54</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Resultados de simulação - Caso Fx</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>MODELO MAGNÉTICO E IMPLEMENTAÇÃO DO ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO NO EFCAD</b>	<b>59</b>
4.1	SIMULAÇÕES LINEARES	61
<b>4.1.1</b>	<b>Alimentação Senoidal</b>	<b>62</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Alimentação Composta de Harmônicos</b>	<b>67</b>
4.2	SIMULAÇÕES NÃO-LINEARES	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>78</b>

5.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .	79
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS EXTRAS DE SIMULAÇÃO: CA-</b>	
	<b>SOS FY E FX+FY . . . . .</b>	<b>83</b>
A.1	SIMULAÇÕES MECÂNICAS . . . . .	83
A.2	SIMULAÇÕES MAGNÉTICAS . . . . .	85

## 1 INTRODUÇÃO

O desempenho de dispositivos elétricos, tais como máquinas rotativas e transformadores de potência, é um domínio de estudo importante no âmbito da engenharia elétrica. A concepção de materiais com melhores propriedades e o emprego de ferramentas de projeto e simulação são utilizados na análise e fabricação de equipamentos, bem como na busca por melhores performances. Com o avanço das tecnologias e dos processos, engenheiros podem se aprofundar nas técnicas e nos modelos aplicados, à medida que diversos pontos de melhoria vão sendo otimizados e consolidados.

A fabricação de materiais, principalmente os ferromagnéticos, com melhores propriedades é um dos tópicos mais estudados devido ao interesse acadêmico e industrial existente e promoveu evoluções no ramo desde o século passado. Com o intuito de otimizar ainda mais a performance de equipamentos elétricos, recentemente houve um aumento nos estudos relativos aos fenômenos de acoplamento entre as propriedades magnéticas dos materiais e as condições mecânicas nas quais um dado dispositivo inerentemente está exposto.

Devido aos diversos tipos de esforços mecânicos existentes durante todo o processo de fabricação, tais como estampagem, corte, *shrink fitting*, bem como os esforços relativos à operação do dispositivo, por exemplo, as forças inerciais existentes na estrutura de uma máquina elétrica, a análise do desempenho de dispositivos elétricos tomando em conta as características magnetomecânicas demanda uma modelagem adequada do acoplamento entre as duas físicas, permitindo o uso de ferramentas de simulação computacional para a obtenção de resultados assertivos.

### 1.1 MOTIVAÇÃO E POSICIONAMENTO DO PROBLEMA

Recentemente, no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), iniciou-se uma linha de pesquisa acerca da influência de carregamentos mecânicos nas propriedades de materiais ferromagnéticos. Uma bancada experimental confeccionada por Mailhé (2018) possibilitou os primeiros estudos de lâminas de aço elétrico submetidas a diferentes condições de esforços de tração e de compressão. Da Silva (2019) proporcionou uma sequência dos estudos, ao analisar o comportamento dos parâmetros dos modelos de perdas de histerese em função das condições mecânicas impostas às lâminas de aço para fins elétricos.

A caracterização desses materiais permite o emprego de ferramentas computacionais para análises de dispositivos elétricos em que a existência de forças mecânicas são inerentes de suas operações ou mesmo do processo de fabricação dos mesmos. Nesse sentido, *softwares* que fazem uso do método dos elementos finitos (MEF) são amplamente utilizados, seja no âmbito acadêmico ou mesmo industrial. No GRUCAD,

o *Electromagnetic Fields Computer Aided Design* (EFCAD) é a ferramenta desenvolvida e aprimorada pelos seus integrantes ao longo dos anos, mas que não contempla, até o momento, o fenômeno do acoplamento magnetomecânico em sua gama de simulações.

Com os trabalhos realizados por Mailhé (2018) e Da Silva (2019), é possível expandir as funcionalidades do EFCAD para que o mesmo possa realizar simulações magnéticas tomando em conta aspectos mecânicos de operação dos equipamentos. Assim, a implementação numérica correspondente ao acoplamento magnetomecânico de materiais ferromagnéticos foi eleita como tópico desse presente trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho possui como objetivo principal continuar a linha de pesquisa conduzida no GRUCAD acerca do acoplamento magnetomecânico na análise de materiais ferromagnéticos e da performance de máquinas elétricas sujeitas a diferentes esforços mecânicos, sobretudo no que diz respeito à implementação numérica de modelos de perdas dependentes de carregamentos mecânicos em ferramentas de simulação baseadas no método dos elementos finitos.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho abrangem:

- i) Obter as constantes para um modelo de função contínua dos parâmetros de um modelo de perdas por histerese, através de um procedimento de ajuste de curvas.
- ii) Desenvolver um modelo de simulação mecânica do dispositivo de estudo escolhido para simulações em ferramenta de elementos finitos multi-físico.
- iii) Adicionar um módulo ao EFCAD que permite computar as perdas por histerese corrigidas pelos esforços mecânicos, após o cálculo magnético do dispositivo de estudo.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo consiste da introdução aqui apresentada.

Em seguida, o capítulo 2 apresenta uma revisão teórica dos conceitos base para compreensão do restante do trabalho.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia aplicada na implementação computacional proposta, bem como são apresentados os resultados das etapas preliminares,

essas essenciais para a geração dos subsídios necessários para o ajuste no cálculo das perdas por histerese.

No capítulo 4 é apresentado o modelo magnético do dispositivo de estudo. Discorre-se sobre as condições de simulações e resultados obtidos após a implementação do ajuste no cálculo das perdas por histerese, comparando casos que levam em conta os esforços mecânicos em relação a casos livres de esforços.

Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se as conclusões obtidas e propostas de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica da implementação numérica a ser realizada ao longo do presente trabalho fundamenta-se sobre dois alicerces: as perdas magnéticas presentes em lâminas de aço para fins elétricos, em particular as perdas por histerese no material ferromagnético e a influência dos carregamentos mecânicos nas propriedades de tais materiais, denominado acoplamento magnetomecânico. Ambos são descritos com maior aprofundamento nas próximas seções.

### 2.1 PERDAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE AÇO PARA FINS ELÉTRICOS

Nos materiais ferromagnéticos, componentes das lâminas de aço para fins elétricos, ocorrem fenômenos microscópicos quando os mesmos são submetidos a um campo magnético externo. Devido a essa excitação, uma variação de magnetização ocorre internamente no material, movimentando as paredes de seus domínios magnéticos e gerando a circulação de correntes induzidas. Devido a esses fenômenos, uma parte da energia fornecida ao material é gasta para gerar os mesmos, ocasionando as perdas magnéticas associadas. De forma a analisar diferentes tipos de materiais, bem como discriminar os componentes das perdas magnéticas, realiza-se um processo experimental de separação de perdas magnéticas (ELIAS, 2014; FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006; GRAHAM, 1982).

Em um material ferromagnético exposto a uma fonte magnética, pode-se obter a sua energia dissipada através da área interna de seu laço de histerese, ou laço BH para ensaios em que a fonte possui uma frequência de operação que promove o surgimento de perdas magnéticas dinâmicas. Dessa forma, a energia  $W$  correspondente pode ser obtida através da Equação (1) (FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006).

$$W_T = \oint HdB = \oint BdH \quad (1)$$

Embora as perdas magnéticas totais possam ser obtidas pela Equação (1), tais perdas podem ser separadas, de modo a diferenciar os componentes de acordo com a origem física e dependência com variações de induções magnéticas e de frequências de operação. Um análise estatística do procedimento experimental acima permite a determinação de três parcelas de perdas magnéticas que influenciam as perdas totais de maneiras diferentes entre si (BERTOTTI, 1998; FIORILLO; APPINO; PASQUALE, 2006). Inicialmente, Steinmetz separou as perdas magnéticas em duas parcelas: as perdas por histerese  $W_h$  e as perdas por correntes induzidas  $W_e$ , também chamadas de perdas clássicas ou perdas de Foucault (STEINMETZ, 1984).

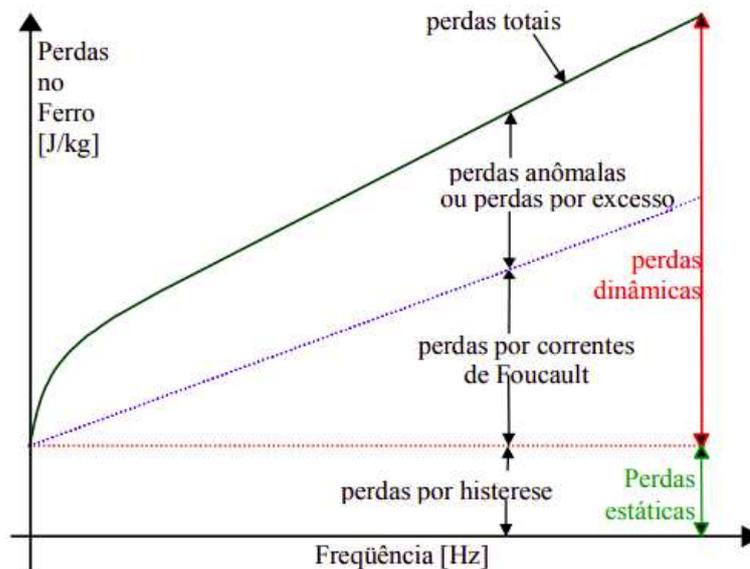
Dando continuidade nesses estudos, Bertotti demonstrou a presença de outra componente de perdas, as perdas excedentes  $W_e$ , adicionada ao modelo proposto

inicialmente por Steinmetz (BERTOTTI, 1985, 1998). Dessa forma, as perdas totais  $W_T$  podem ser expressas de acordo com a Equação (2), onde  $W_c$  e  $W_e$  são componentes dependentes da frequência de operação  $f$  e são denominadas perdas dinâmicas.

$$W_T = W_h + W_c + W_{exc} \quad (2)$$

Na Figura 1 são ilustradas as três componentes de perdas, bem como as perdas totais, em função da frequência da fonte de excitação, mantida constante a indução magnética imposta. Observando as perdas por histerese, nota-se que elas são caracterizadas por um reta de valor constante, indicando independência com a frequência. Na figura, é possível observar também as características das perdas clássicas e das perdas excedentes em relação à frequência de operação  $f$ . Embora as perdas por histerese e as perdas clássicas possam ser encontradas através de expressões matemáticas, conforme será descrito nas seções posteriores, as perdas excedentes são obtidas pela diferença entre as perdas totais  $W_T$  (Equação (1)) e a soma das perdas por histerese e perdas clássicas.

Figura 1 – Componentes das perdas magnéticas em função da frequência.



Fonte – (BATISTELA, 2001)

Com o passar do tempo, e em virtude dos diversos estudos empregados na área, os modelos de perdas de Steinmetz e Bertotti foram sendo modificados, de modo a aprimorá-los. Em seguida, apresentam-se as perdas por histerese, dinâmicas e excedentes, os fenômenos que promovem suas aparições e os modelos empíricos que serão a base para a implementação computacional posterior.

## 2.2 PERDAS POR HISTERESE

De acordo com a Figura 1, percebe-se que as perdas por histerese são independentes da frequência, recebendo a denominação de perdas estáticas (STEINMETZ, 1984). Em um procedimento de separação de perdas, as perdas por histerese são extraídas ao analisar o material sujeito à uma excitação cuja frequência é extremamente baixa, considerado regime quase estático, no qual pode-se desprezar as perdas dinâmicas.

Fisicamente, as perdas por histerese decorrem do movimento das paredes dos domínios magnéticos no material (GRAHAM, 1982). Bertotti considera também que as perdas por histerese têm origem no processo de magnetização, visto em escala microscópica (BERTOTTI, 1988). Nesta análise, percebe-se que o processo de magnetização é descontínuo, ocorrendo “saltos” das paredes dos domínios, que contribuem para a formação das perdas estáticas (MAZZETTI, 1978).

A equação para as perdas por histerese  $P_h$ , em [W/kg], proposta por Steinmetz é indicada pela Equação (3), onde  $f_0$  é a frequência da indução magnética, considerada com uma evolução senoidal, na qual o procedimento é realizado,  $B_p$  é o valor de pico da indução,  $K_h$  e  $\alpha$  são constantes. Para os materiais ferromagnéticos que constituem as lâminas de aço elétrico,  $\alpha$  varia tipicamente entre 1,4 e 1,8. No entanto, Batistela ressalta que em alguns casos esse modelo proposto não produz resultados satisfatórios ao se aplicar um ajuste de curvas, em particular para elevados valores de indução magnética de pico  $B_p$  (BATISTELA, 2001).

$$P_h = K_h B_p^\alpha f_0 \quad (3)$$

Com a continuidade dos estudos realizados por autores acerca das perdas magnéticas, diversos modelos foram propostos para descrever as perdas por histerese de uma maneira mais assertiva. Em particular, um modelo sugerido no trabalho de Ionel *et al.* (2006) modifica o parâmetro  $\alpha$  da Equação (3) por um polinômio de terceira ordem dependente da indução magnética de pico  $B_p$ , de acordo com a Equação (4).

$$P_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2 + \alpha_3 B_p^3} f_0 \quad (4)$$

Um material ferromagnético sujeito a esforços mecânicos possui uma alteração relevante em suas perdas magnéticas, sobretudo na parcela das perdas histeréticas. Segundo o trabalho de Da Silva (2019), os parâmetros do modelo acima possuem uma melhor tendência de comportamento, quando comparados ao modelo da Equação (3), em função do carregamento mecânico aplicado sobre as amostras do aço elétrico E230, permitindo que uma função genérica possa ser mais facilmente modelada, através de procedimentos ajuste de curvas, para o cálculo das perdas por histerese em um material sujeito a diversos níveis de esforços mecânicos  $\sigma$ . Essa conclusão torna o

modelo da Equação (4) uma boa escolha para a implementação computacional a ser apresentada posteriormente nesse trabalho.

### 2.3 PERDAS CLÁSSICAS

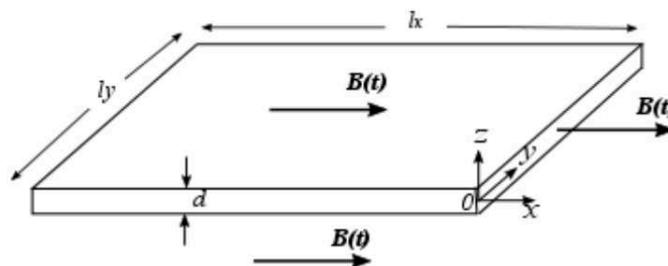
As perdas clássicas são originadas por uma variação da indução magnética no material (GRAHAM, 1982). No entanto, os fenômenos envolvidos são supostos ocorrerem em escala macroscópica e devido ao material ferromagnético ser um condutor elétrico, com condutividade  $\sigma_e$  (BERTOTTI, 1984, 1988). Uma técnica empregada na fabricação de equipamentos elétricos consiste em laminar o material, atenuando a circulação de correntes induzidas no núcleo magnético e reduzindo as perdas clássicas no dispositivo (BASTOS, 2012).

Para uma lâmina de seção transversal retangular e submetida a uma indução magnética variável  $B(t)$ , as perdas clássicas, obtidas instantaneamente em [W], são dadas pela Equação (5), sendo  $V$  o volume da amostra do material e  $d$  a sua espessura.

$$P_c = \frac{1}{12} \sigma_e V d^2 \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 \quad (5)$$

Uma lâmina de aço elétrico indicada na Figura 2, submetida a uma indução magnética variável, possui potência média dissipada por ciclo de acordo com a Equação (6), em [W/kg]. Na expressão,  $m_v$  é a massa específica do material e  $T$  é o período da indução  $B(t)$ , sendo  $T = 1/f$ . Um maior detalhamento do cálculo das perdas clássicas para chapas de aço elétrico pode ser encontrado na obra de Bastos (2012).

Figura 2 – Lâmina de aço elétrico exposta a uma indução magnética  $B$  na direção  $x$ .



Fonte – (BASTOS, 2012)

$$P_c = \frac{\sigma_e d^2}{12 m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 dt \quad (6)$$

Considerando a indução magnética como uma excitação senoidal e unidirecional, as perdas de potência em [W/kg] e de energia em [J/kg] em virtude das correntes induzidas são expressas pela Equação (7) e Equação (8), respectivamente.

$$P_c = \frac{\sigma_e d^2}{6 m_v} \pi^2 B_p^2 f_0^2 \quad (7)$$

$$W_c = \frac{\sigma_e d^2}{6 m_v} \pi^2 B_p^2 f_0 \quad (8)$$

Considerando nas equações acima que a espessura  $d$  da lâmina, a massa específica  $m_v$  e a condutividade elétrica  $\sigma_e$  são constantes, pode-se escrever uma versão condensada das equações de perda de potência e de energia, expressas na Equação (9) e Equação (10).

$$P_c = K_c B_p^2 f_0^2 \quad (9)$$

$$W_c = K_c B_p^2 f_0 \quad (10)$$

## 2.4 PERDAS EXCEDENTES

Por um bom tempo, assumiu-se que as perdas dinâmicas eram equivalentes às perdas clássicas. No entanto, os ensaios em amostras de aços elétricos indicaram a presença de uma outra parcela de perda, até então não compreendida e sem possuir um modelo para sua quantificação. Até hoje são conduzidos estudos acerca dessa parcela de perdas, com o intuito de melhor descrevê-la.

Em 1978, Mazzetti relacionou tais perdas ao movimento descontínuo e randômico das paredes dos domínios magnéticos, também responsáveis pelas perdas por histerese (MAZZETTI, 1978). Em 1998, Bertotti mencionou que as perdas excedentes são ocasionadas por correntes induzidas que circulam no contorno das paredes dos domínios magnéticos devido à variação da excitação magnética a qual o material está sujeito (BERTOTTI, 1998).

Bertotti apresentou uma expressão para cálculo das perdas excedentes de acordo com a Equação (11) (BERTOTTI, 1985). O cálculo considera algumas características intrínsecas do material, como o número de objetos magnéticos ativos no estado quase estático  $n_0$  e o campo magnético característico  $V_0$ , determinante no aumento de objetos magnéticos devido à excitação magnética externa. Além disso,  $\rho$  é a densidade do material,  $\sigma_e$  é a sua condutividade elétrica,  $S$  é a seção transversal e  $G$  é uma constante.

$$P_{exc} = \frac{1}{\rho} 2B_p f \left( \sqrt{n_0^2 V_0^2 + 2\pi^2 \sigma_e G S V_0 B_p f} - n_0 V_0 \right) \quad (11)$$

Em 1988, Bertotti propôs um novo modelo para as perdas excedentes, considerando um regime de operação senoidal para a indução. A expressão, dada pela

Equação (12), possui apenas um parâmetro a ser determinado via ajuste de curvas (BERTOTTI, 1998).

$$W_{exc} = K_{exc} B_p^{1,5} f_0^{0,5} \quad (12)$$

## 2.5 INFLUÊNCIAS DE CARREGAMENTOS MECÂNICOS - O ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO

O acoplamento magnetomecânico é o nome dado às alterações que podem ocorrer em características mecânicas ou magnéticas de um material devido à existência de um campo magnético e um carregamento mecânico, respectivamente. A exposição de um material a um campo magnético provoca alterações em suas características geométricas, modificando suas dimensões físicas, como largura e espessura. Tal fenômeno é denominado magnetostrição. Por outro lado, a aplicação de uma carga mecânica, seja de tração ou de compressão, sobre um material provoca alteração em suas características magnéticas, como permeabilidade magnética  $\mu$  e perdas magnéticas. Tal fenômeno é denominado magnetostrição inversa, ou efeito Villari. Ambos os fenômenos serão tratados ao longo dessa seção.

### 2.5.1 Magnetostrição

Joule constatou, em 1842, que submeter um material a um campo magnético  $H$  poderia alterar as dimensões de um volume do mesmo. A observação ocorreu sobre uma barra de ferro que teve um alongamento de seu comprimento após o processo de magnetização da mesma. A magnetostrição  $\lambda$  de um material é obtida através da Equação (13), ao se obter a razão da alteração  $\Delta L$  de uma dimensão física do material pela sua dimensão original  $L$ . No ponto de saturação magnética do material, a magnetostrição obtida é denominada magnetostrição de saturação, de valor  $\lambda_s$  (CULLITY; GRAHAM, 2009; BOHN, 2005).

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (13)$$

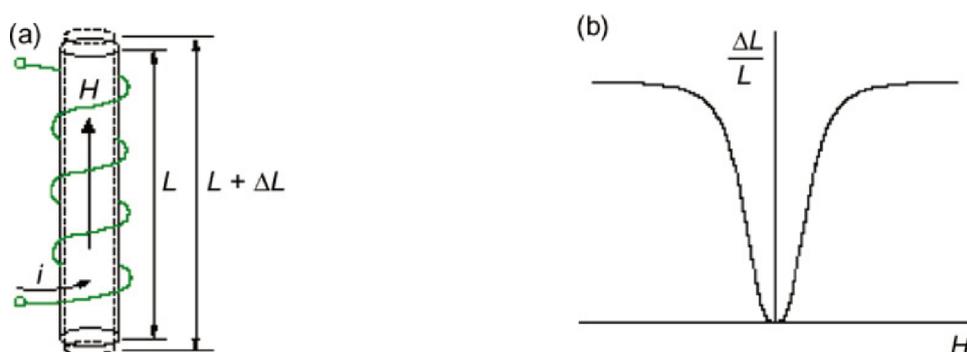
A variação  $\Delta L$  ocorre na direção paralela ao campo magnético imposto e, na direção perpendicular ao campo, ocorre uma variação contrária, de modo a manter o volume do material aproximadamente constante (CULLITY; GRAHAM, 2009; BOHN, 2005). A variação contrária que ocorre na direção perpendicular ao campo magnético é denominada magnetostrição transversa, de valor  $\lambda_t$ , obtido pela Equação (14).

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

A Figura 3a apresenta uma barra cilíndrica de material ferromagnético submetida ao campo magnético  $H$  com sentido indicado na figura, gerado pela corrente

alternada  $i$ , que percorre um condutor envolvendo a barra. A linha sólida representa as dimensões originais da barra e a linha tracejada indica as alterações geométricas que ocorrem na presença do campo  $H$ , sendo um aumento  $\Delta L$  na direção paralela ao campo e uma redução no seu diâmetro, direção perpendicular ao campo. A curva de magnetostricção  $\lambda$  da Figura 3b indica as alterações do comprimento longitudinal da barra em função do valor do campo magnético. Para valores elevados do campo  $H$ , entra-se na região de saturação do material, e a magnetostricção  $\lambda$  pouca se altera, sendo  $\lambda_s$  o valor de saturação da curva. Percebe-se também que o sinal de  $\lambda$  não é dependente do sentido de aplicação do campo magnético  $H$ .

Figura 3 – Fenômeno da magnetostricção sobre uma barra de material ferromagnético.



(a) Alterações de dimensões do material devido à imposição de campo magnético  $H$ .

(b) Curva de magnetostricção  $\lambda$  em função do campo magnético  $H$ .

Fonte – (EKREEM *et al.*, 2007)

## 2.5.2 Magnetostricção inversa

Para o fenômeno da magnetostricção, tem-se valores típicos de  $\lambda_s$  na faixa de  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ , o que em geral não provoca grandes deformações geométricas no material. Apesar do efeito de magnetostricção ser pouco relevante, o efeito de magnetostricção inversa é mais pertinente, pois tensões mecânicas, internas ou externas, podem modificar importantes características magnéticas do material, tais como a sua permeabilidade magnética  $\mu$  e sua indução remanente  $b_r$  (CULLITY; GRAHAM, 2009; JILES, 1995).

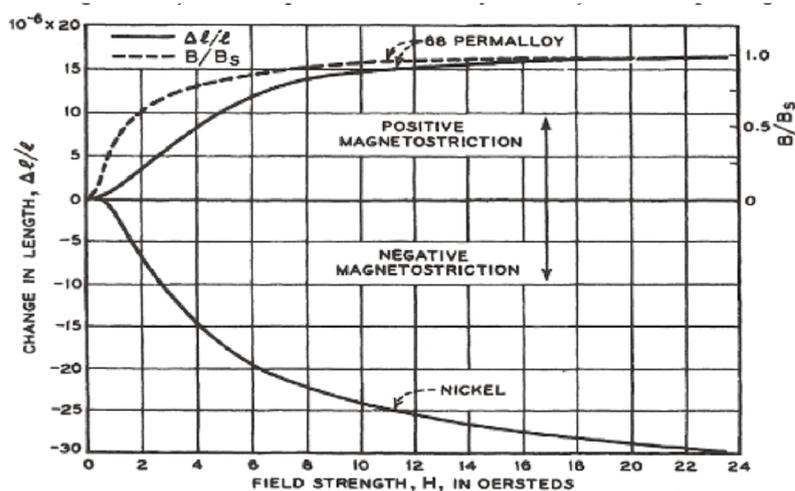
O efeito Villari, portanto, é de maior interesse nesse trabalho, pois deseja-se realizar a modelagem numérica das alterações das perdas magnéticas em virtude da presença de esforços mecânicos sobre o dispositivo de estudo. Além da divisão do acoplamento magnetomecânico entre os fenômenos de magnetostricção e magnetostricção inversa, pode-se classificar o acoplamento de acordo com o comportamento do material frente aos esforços mecânicos: a magnetostricção positiva e a magnetostricção negativa, que serão tratados a seguir.

### 2.5.3 Magnetostricção positiva e magnetostricção negativa

Cada material pode ter um reflexo diferente frente a um mesmo esforço mecânico aplicado. Uma magnetostricção positiva indica que o material sofrerá uma expansão na direção na qual o campo magnético está aplicado. No caso da magnetostricção negativa, uma contração na direção longitudinal ao campo irá ocorrer (BOZORTH, 1993).

Na Figura 4, tem-se as curvas de magnetostricção  $\lambda$  de dois materiais ferromagnéticos comuns tanto em estudos como em aplicações: o níquel e o 68 Permalloy (68 Ni-Fe). O níquel possui magnetostricção negativa, enquanto o 68 Permalloy possui magnetostricção positiva. Um aumento do campo  $H$  provoca valores positivos de  $\lambda$  para o 68 Permalloy e valores negativos de  $\lambda$  para o níquel.

Figura 4 – Curva de magnetostricção  $\lambda$  em função do campo magnético  $H$  para o níquel e 68 Permalloy.

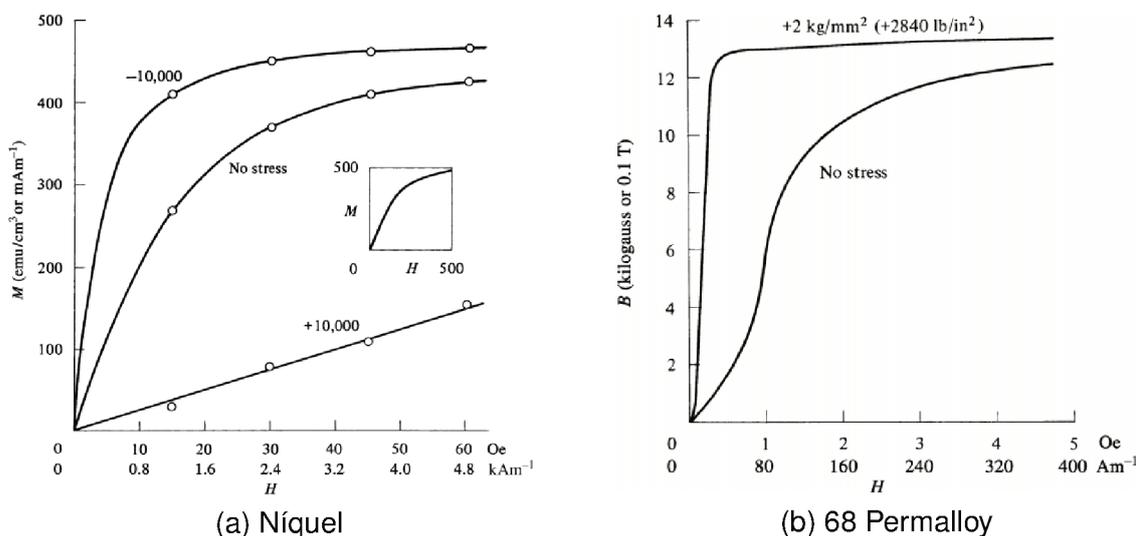


Fonte – (BOZORTH, 1993)

Do ponto de vista magnético, materiais com magnetostricção positiva apresentam uma melhora no comportamento magnético quando esforços de tração são aplicados na direção do campo magnético e uma degradação frente a esforços de compressão alinhados na direção do campo magnético. O contrário é percebido para materiais com magnetostricção negativa, que apresentam melhoras para esforços de compressão e piores para esforços de tração (CULLITY; GRAHAM, 2009; MAILHÉ, 2018). Ao longo de todo esse trabalho, para esforços de tração tem-se  $\sigma > 0$  MPa e para esforços de compressão tem-se  $\sigma < 0$  MPa. Na Figura 5 tem-se as curvas de magnetização para o níquel (Figura 5a) e para o 68 Permalloy (Figura 5b). Na Figura 5a, para um esforço de tração de 10.000 lb/in<sup>2</sup> (aproximadamente 69 MPa), o níquel apresenta uma piora em sua curva de magnetização, por um decréscimo em sua permeabilidade. No entanto, um esforço de compressão de igual intensidade provoca uma melhora expressiva. Para a Figura 5b, o material 68 Permalloy apresenta uma melhora em sua

permeabilidade quando sujeito a um carregamento mecânico de tração de 2480 lb/in<sup>2</sup> (aproximadamente 20 MPa).

Figura 5 – Variação das curvas de magnetizações para materiais com magnetostrições distintas.

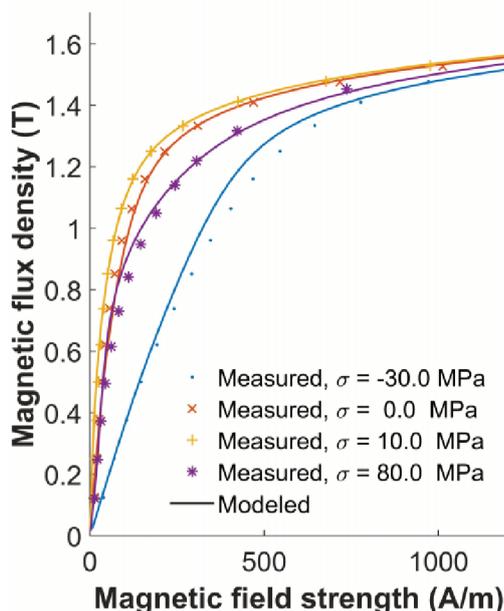


Fonte – (CULLITY; GRAHAM, 2009)

No entanto, um material pode exibir um comportamento específico (melhoria ou piora) em suas características magnéticas em uma faixa de esforços e o comportamento oposto para outra faixa de esforços, o que mostra que a classificação de magnetostrição positiva e negativa é uma simplificação de nomenclatura. Por exemplo, um material pode apresentar melhoria nas características magnéticas para pequenos esforços de tração e, com o aumento do esforço, ter uma degradação das mesmas (CULLITY; GRAHAM, 2009; MAILHÉ, 2018).

Na Figura 6, tem-se as curvas de magnetização experimentais obtidas por Aydin para uma amostra de Fe-Si de grão não orientado (M400-50A) (AYDIN *et al.*, 2017). O material foi ensaiado em uma situação sem esforços mecânicos (*stressless*), sujeito a um esforço de compressão de 30 MPa e esforços de tração de 10 MPa e 80 MPa. A curva obtida para a tensão de 10 MPa indica uma melhora nas características magnéticas em relação ao caso *stressless*, mas a curva para a tensão de 80 MPa indica um decréscimo na permeabilidade magnética, apresentando a complexidade mencionada anteriormente para o fenômeno da magnetostrição.

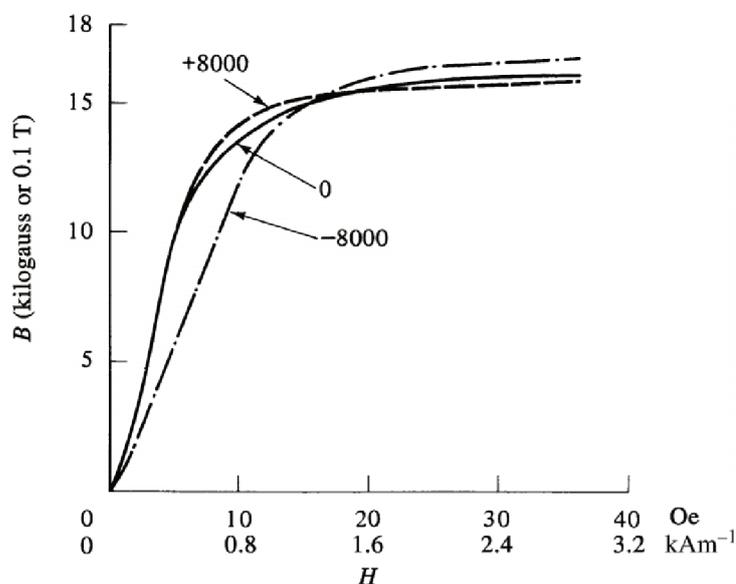
Figura 6 – Resultados de ensaios e simulação de magnetização para amostra de Fe-Si sujeita a esforços de tração e compressão.



Fonte – (AYDIN *et al.*, 2017)

Assim como o nível de esforço mecânico aplicado no material pode provocar um comportamento complexo, conforme visto anteriormente, o nível de campo magnético o qual o material está submetido também pode gerar uma inversão no comportamento das características magnéticas além de uma faixa de campo magnético  $H$ . Na Figura 7, tem-se a caracterização de um material em uma situação *stressless*, e submetido a esforços de tração e de compressão. Para o ensaio em que uma tensão de tração de valor  $8000 \text{ lb/in}^2$  (aproximadamente  $55 \text{ MPa}$ ) é aplicada, o material apresenta características magnéticas ligeiramente superiores em relação ao caso *stressless*, mas apenas até um campo magnético de cerca de  $1,6 \text{ kA/m}$ , apresentado um desempenho pior além desse nível de campo  $H$ . O ensaio em que o esforço de compressão de  $8000 \text{ lb/in}^2$  é aplicado apresenta o comportamento oposto: uma degradação das características magnéticas em relação ao caso sem estresse até  $1,6 \text{ kA/m}$ , seguido de uma melhora além do mesmo ponto.

Figura 7 – Curva de magnetização experimental para material submetido a esforços de tração e de compressão de 55 MPa.

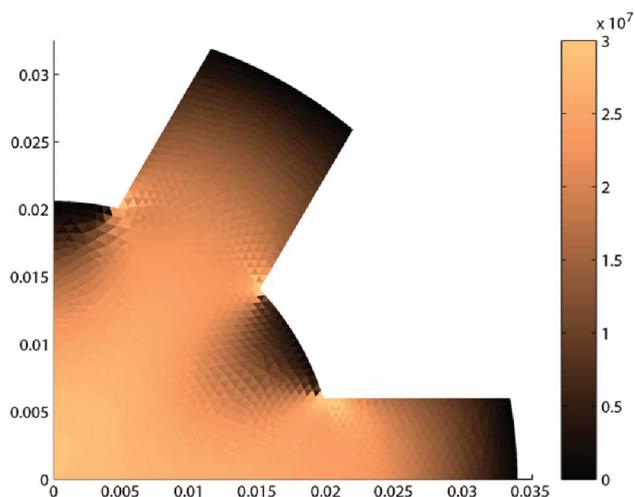


Fonte – (CULLITY; GRAHAM, 2009)

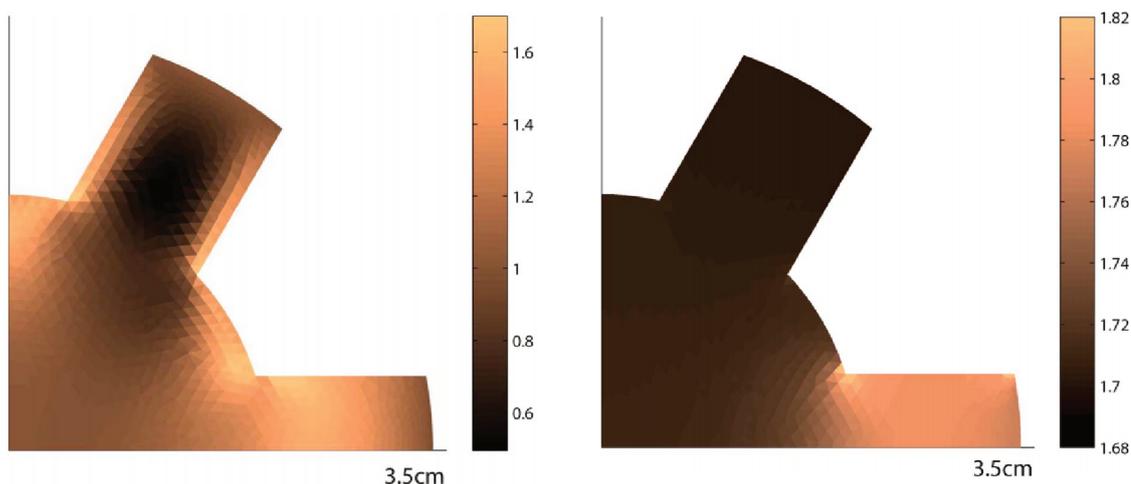
## 2.6 ESTUDOS DE ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Na literatura existem diversos estudos, experimentais ou através de simulações computacionais, acerca do acoplamento magnetomecânico, da magnetostricção e magnetostricção inversa em dispositivos elétricos, como transformadores e máquinas elétricas. Bernard, Mininger *et al.* (2011) analisam o impacto de carregamentos mecânicos sobre um motor de relutância, separando os esforços mecânicos entre os oriundos de processos de montagem e fabricação (perfuração, estampagem, corte, soldagem ou *shrink fitting*) e os oriundos da operação do dispositivo (forças inerciais radiais, como forças centrífugas), em virtude do movimento de rotação do rotor, tensões oriundas da pressão na estrutura do dispositivo devido à magnetostricção e tensões induzidas pelas forças magnéticas que surgem devido aos campos magnéticos e às induções magnéticas distribuídos pela máquina. A Figura 8 apresenta os resultados de simulação para o motor de relutância.

Figura 8 – Resultados de simulação para motor de relutância obtidos por Bernard, Mininger *et al.* (2011).



(a) Estresse radial inercial  $\sigma_{rr}$  (Pa) no rotor ( $N = 3000$  rpm)



(b) Razão  $\mu_{\sigma}/\mu_{ref}$  (estresse inercial)

(c) Razão  $\mu_{\sigma}/\mu_{ref}$  (estresse  $\sigma_{zz} = -30$  MPa)

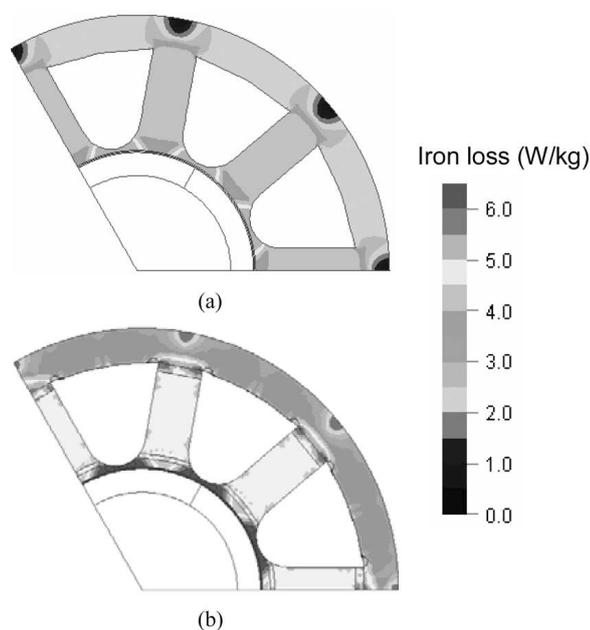
Fonte – (BERNARD; MININGER *et al.*, 2011)

A Figura 8a exibe a distribuição de tensões radiais no modelo de 1/4 do rotor, quando a máquina possui uma rotação de 3000 rpm, indicando que as tensões podem chegar até 30 MPa. A Figura 8b apresenta a distribuição da razão entre a permeabilidade magnética após o esforço inicial oriundo da rotação da máquina em 3000 rpm e a permeabilidade magnética na máquina sem esforço. Em alguns pontos, a permeabilidade é reduzida pela metade, ao passo que em outros pontos a mesma aumenta em até cerca de 60%. A Figura 8c apresenta a mesma razão de permeabilidades, mas para um carregamento mecânico de -30 MPa não direção  $z$ , de modo a replicar o esforço que um empilhamento das lâminas de aço pode gerar. Nessa situação, ocorre um aumento na permeabilidade de 68% até 82% em toda a estrutura.

Bernard e Daniel (2015) e Miyagi *et al.* (2009) realizaram estudos acerca do *shrink fitting* e sua influência em máquinas, empregando cálculos por elementos finitos. O processo de *shrink fitting* é utilizado na montagem de motores e consiste de aquecer ou resfriar uma determinada parte do conjunto, fazendo uso da expansão ou contração térmica para realizar a junção das peças da máquina quando a temperatura se reestabelecer à temperatura ambiente. O procedimento pode ser utilizado em motores quando se aquece o eixo do rotor antes de instalá-lo no núcleo do rotor ou quando se resfria o estator para realizar a inserção na carcaça, por exemplo. Quando a peça aquecida ou resfriada retorna à temperatura ambiente, esforços de tração e de compressão surge em determinados pontos do dispositivo.

Em 2009, Miyagi constatou um aumento de 28% nas perdas no ferro de um motor devido ao processo de *shrink fitting*. A Figura 9 apresenta as distribuições de perdas magnéticas para uma máquina síncrona de ímãs permanentes em duas situações: (a) livre do efeito de *shrink fitting* e (b) sob influência dele. Ocorre tanto uma alteração nos valores das perdas como uma modificação na distribuição das mesmas entre os casos (a) e o (b) (MIYAGI *et al.*, 2009).

Figura 9 – Distribuição de perdas no ferro (a) desprezando efeito de *shrink fitting* e (b) considerando o efeito.

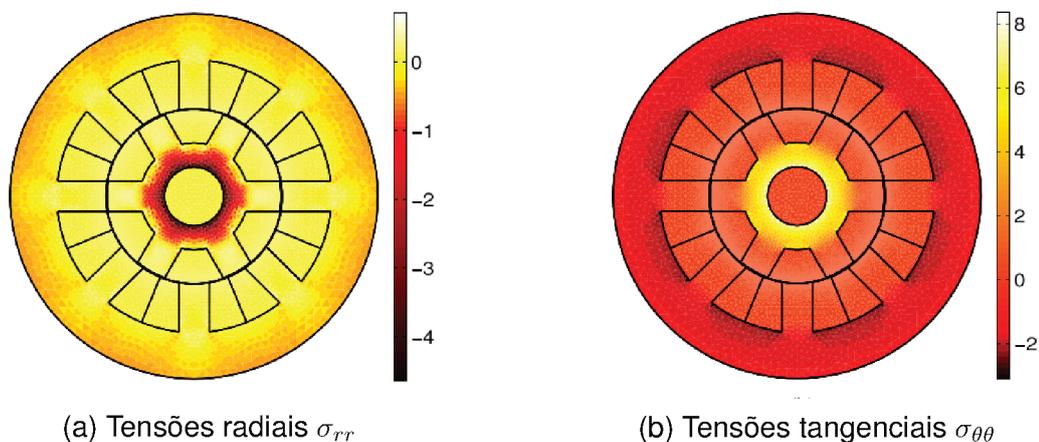


Fonte – (MIYAGI *et al.*, 2009)

A Figura 10 apresenta as tensões radial  $\sigma_{rr}$  e transversal  $\sigma_{\theta\theta}$  para um estudo de Bernard e Daniel (2015), que simulou esforços oriundos da montagem da máquina através da aplicação de um deslocamento de  $0,5 \mu\text{m}$  no raio interno e de  $0,5 \mu\text{m}$  no raio externo do dispositivo. Percebe-se que ocorrem compressões radiais de até 4 MPa

no rotor da máquina, enquanto que na direção tangencial surgem trações de até 8 MPa na região do rotor e compressões de até 2 MPa em outras partes da estrutura.

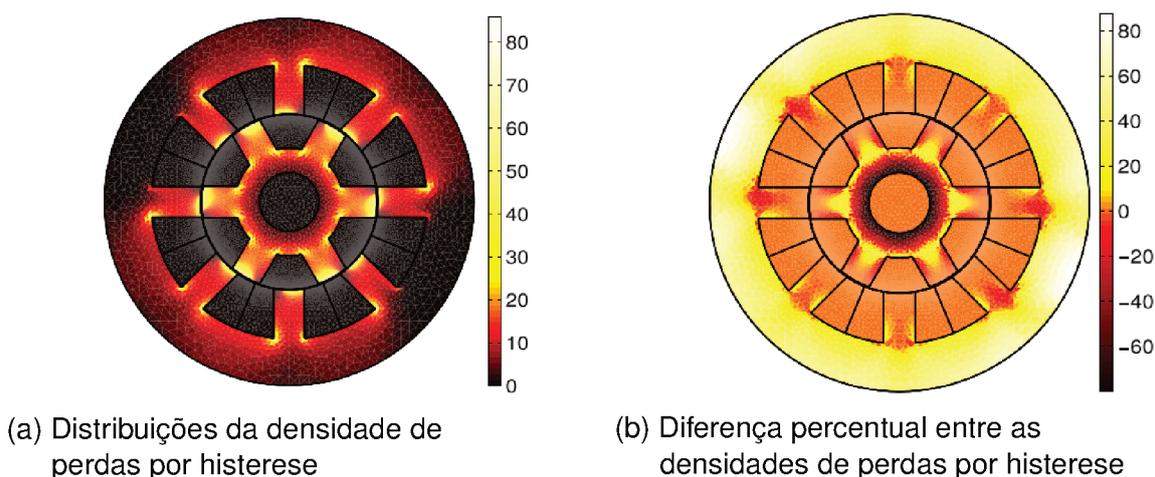
Figura 10 – Impacto do *shrink fitting* em um motor de relutância - tensões.



Fonte – (BERNARD; DANIEL, 2015)

Ao se aplicar deslocamentos de  $2,5 \mu\text{m}$  no dispositivo, ocorrem alterações na distribuição de perdas por histerese, conforme apresentado na Figura 11, onde percebe-se que ocorrem aumento de perdas de cerca de 40% (comparado ao caso sem deslocamentos) em uma grande parte do estator e reduções de cerca de 40% nas regiões mais internas do rotor.

Figura 11 – Impacto do *shrink fitting* em um motor de relutância - perdas por histerese.



Fonte – (BERNARD; DANIEL, 2015)

## 2.7 MODIFICAÇÃO NOS MODELOS DE PERDAS MAGNÉTICAS EM VIRTUDE DE CARREGAMENTOS MECÂNICOS

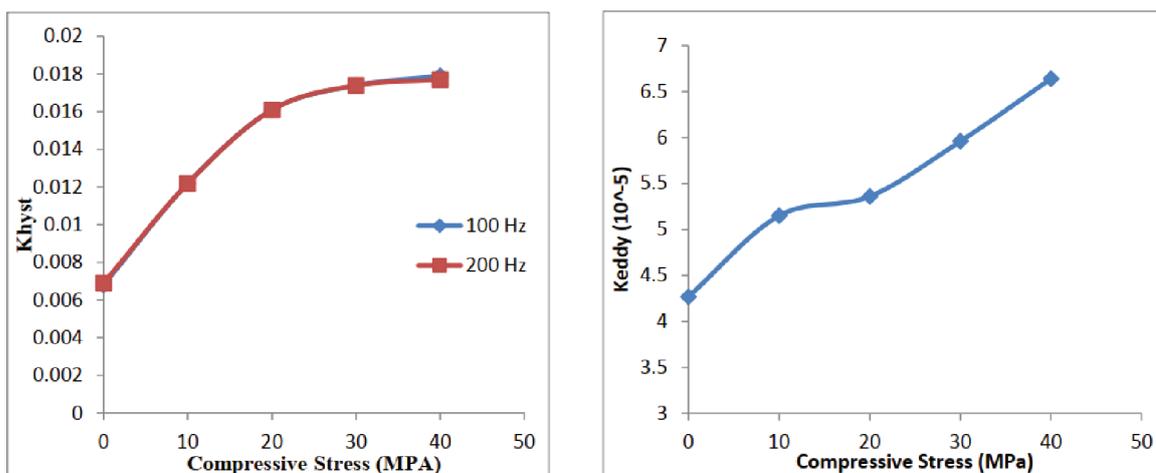
De acordo com o que foi exposto na Seção 2.5, as perdas magnéticas existentes em máquinas elétricas são afetadas significativamente pelos esforços mecânicos aos quais o dispositivo está sujeito durante seu processo de fabricação e em sua operação. A alteração nas perdas magnéticas implica, intuitivamente, em uma modificação das curvas de perdas magnéticas do material ferromagnético utilizado na construção da máquina, bem como dos parâmetros dos modelos de perdas empregados em estudos de caracterização de materiais, visto que os parâmetros anteriormente extrapolados não devem representar fielmente o comportamento do material frente aos carregamentos mecânicos.

Diversos trabalhos e estudos vêm sendo realizados acerca do comportamento dos parâmetros de modelos de perdas magnéticas de materiais utilizados em lâminas de máquinas elétrica em função do esforço mecânico aplicado sobre os mesmos, com o intuito de melhor descrever a relação entre eles em um formato que possa ser aplicado em ferramentas de cálculo computacional que fazem uso do método de elementos finitos. Alguns desses estudos e seus resultados são apresentados na sequência, de modo a sintetizar a abordagem escolhida para posterior implementação nesse presente trabalho.

Em 2015, Saeed, na sua dissertação de mestrado, estudou a influência de esforços de compressão de até 40 MPa nos parâmetros dos modelos de perdas de histerese, clássicas e excedentes, indicados segundo o autor por  $K_{hyst}$ ,  $K_{eddy}$  e  $K_a$ , respectivamente. A formulação das perdas totais, em [W], é dada no estudo segundo:  $P_{tot} = K_{hyst} B_p^\alpha f + K_{eddy} B_p^2 f^2 + K_a B_p^{1,5} f^{1,5}$ , ensaiando o material em uma frequência com diferentes valores de indução de pico  $B_p$  e obtendo as constantes através de procedimento de ajuste de curvas (SAEED, 2015). A Figura 12a apresenta os resultados dos valores de  $K_{hyst}$  para as frequências de 100 Hz e 200 Hz, com indução magnética de 1 T, onde a independência da frequência para esse parâmetro pode ser notada. Percebe-se também que ocorre um aumento expressivo do parâmetro até cerca de 20 MPa, apresentando um comportamento de saturação de 20 MPa até 40 MPa. As Figura 12b e Figura 12c apresentam os parâmetros  $K_{eddy}$  e  $K_a$  para a frequência de 100 Hz, com indução magnética de 1 T. O parâmetro  $K_{eddy}$  é o que apresenta maior variação com o nível de esforço de compressão, enquanto que o parâmetro  $K_a$  se comporta de maneira semelhante ao  $K_{hyst}$ .

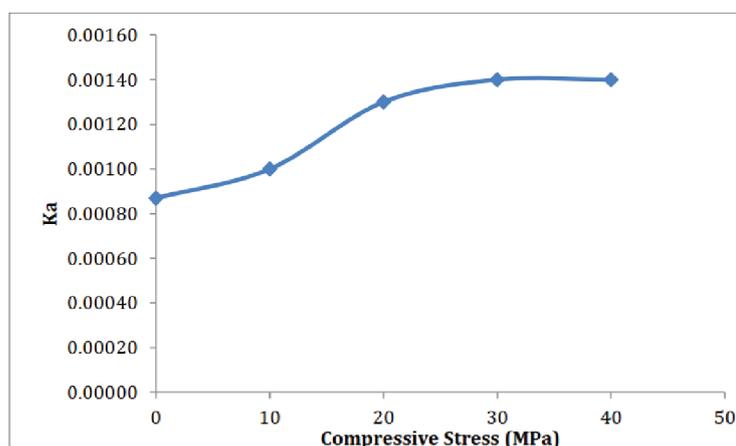
Karthus *et al.* (2017) analisaram o comportamento dos parâmetros de um modelo de perdas que apresenta algumas modificações em comparação com o trabalho de SAEED. As perdas por histerese passam a conter um polinômio de primeira ordem em  $B_p$  no expoente, de modo que a expressão para as perdas por histerese fica:  $P_h = a_1 B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p} f$ . As perdas clássicas apresentam um termo adicional, de modo a

Figura 12 – Variação dos parâmetros de um modelo de perdas para esforços de compressão de 0 MPa até 40 MPa e indução magnética de 1 T.



(a)  $K_{hyst}$  nas frequências de 100 Hz e 200 Hz

(b)  $K_{eddy}$  na frequência de 100 Hz

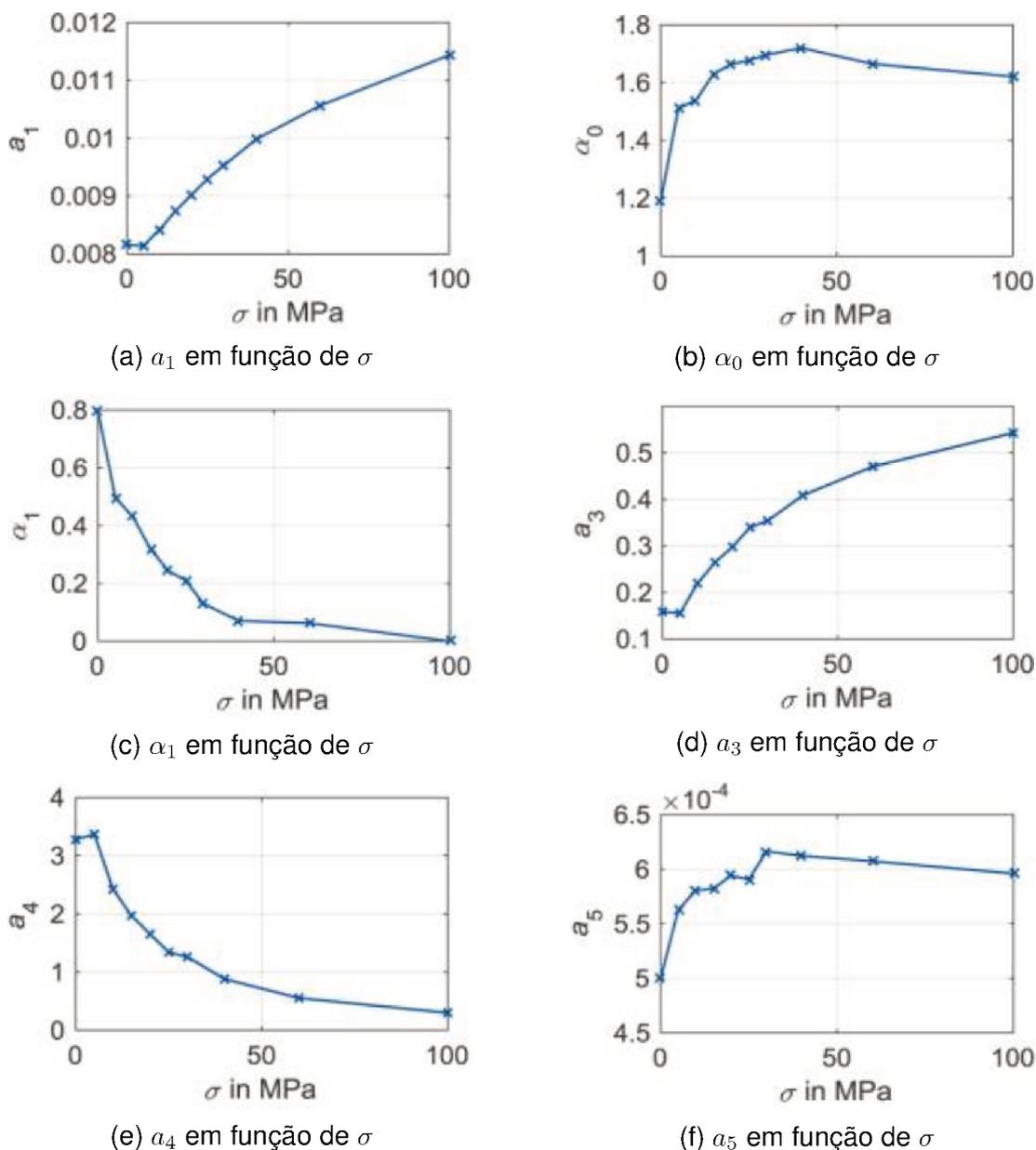


(c)  $K_a$  na frequência de 100 Hz

Fonte – (SAEED, 2015)

contemplar o comportamento não linear dessa parcela de perdas para altos valores de indução magnética, através da formulação:  $P_c = a_2 B_p^2 f^2 + a_2 a_3 B_p^{2+a_4} f^2$ . As perdas excedentes possuem expressão semelhante ao estudo anterior:  $P_{exc} = a_5 B^{1,5} f^{1,5}$ . Exceto o parâmetro  $a_2$ , que depende apenas de propriedades do material, os outros seis parâmetros sofreram alterações quando extrapolados em diferentes níveis de esforços de tração. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos, indicando a significativa dependência dos parâmetros com o estresse mecânico aplicado.

Figura 13 – Variação dos coeficientes de um modelo de perdas para esforços de tração de 0 MPa até 100 MPa.

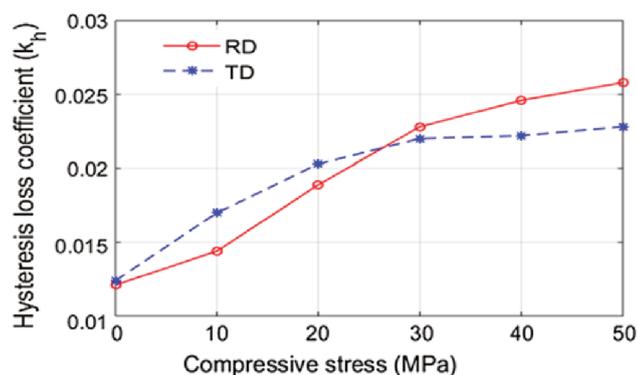


Fonte – (KARTHAUS *et al.*, 2017)

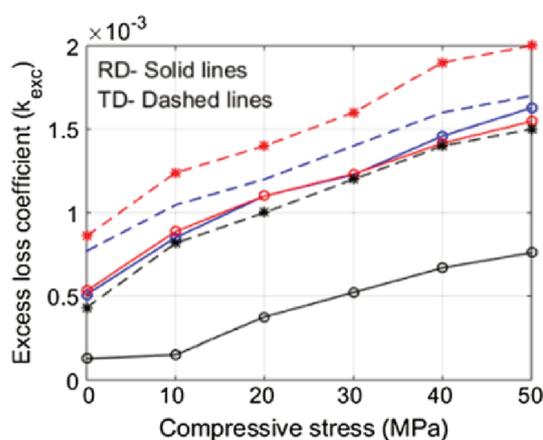
Em Baghel *et al.* (2019), um estudo semelhante foi conduzido, avaliando-se o comportamento dos coeficientes do modelo de perdas frente a esforços de compressão mecânica, porém para amostras, compostas de lâminas de Fe-Si de grãos não orientados, com angulações de 0° (RD) e 90° (TD) entre as direções de corte e laminação. As expressões para as perdas clássicas e perdas excedentes são as mesmas da dissertação de Saeed, enquanto que a formulação das perdas por histerese apresenta um polinômio de segunda ordem em  $B_p$  no expoente, sendo as perdas totais dadas por:  $P_{tot} = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_1 B_p + \alpha_2 B_p^2} f + K_c B_p^2 f^2 + K_{exc} B_p^{1.5} f^{1.5}$ . Na Figura 14, tem-se o com-

portamento dos parâmetros  $K_h$ ,  $K_{exc}$  e  $\alpha$ , que corresponde ao expoente polinomial de segunda ordem em  $B_p$ , para esforços de compressão de 0 MPa até 50 MPa. Na figura, as curvas contínuas correspondem aos resultados da amostra RD, enquanto que as curvas tracejadas correspondem aos resultados da amostra TD. As curvas nas cores vermelha, azul e preta indicam os resultados obtidos em níveis de indução magnética de 0,5 T, 1 T e 1,5 T, respectivamente.

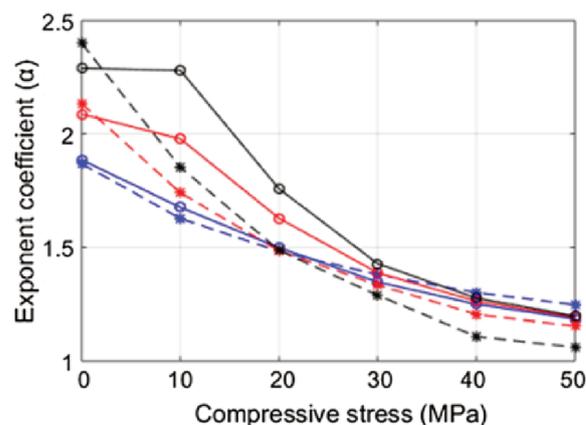
Figura 14 – Comportamento de parâmetros de modelo de perdas para amostras com duas direções de corte diferentes.



(a)  $K_h$  para as amostras TD e RD



(b)  $K_{exc}$  para as amostras TD e RD



(c) Expoente  $\alpha$  para as amostras TD e RD

Fonte – (BAGHEL *et al.*, 2019)

Até cerca de 25 MPa, o parâmetro  $K_h$  da amostra TD é superior ao da amostra RD, apresentando comportamento oposto a partir desse nível de compressão. Para  $K_{exc}$ , em todos os níveis de indução teve-se que os parâmetros para a amostra TD são sempre superiores aos da amostra RD, na faixa de esforços mecânicos do estudo.

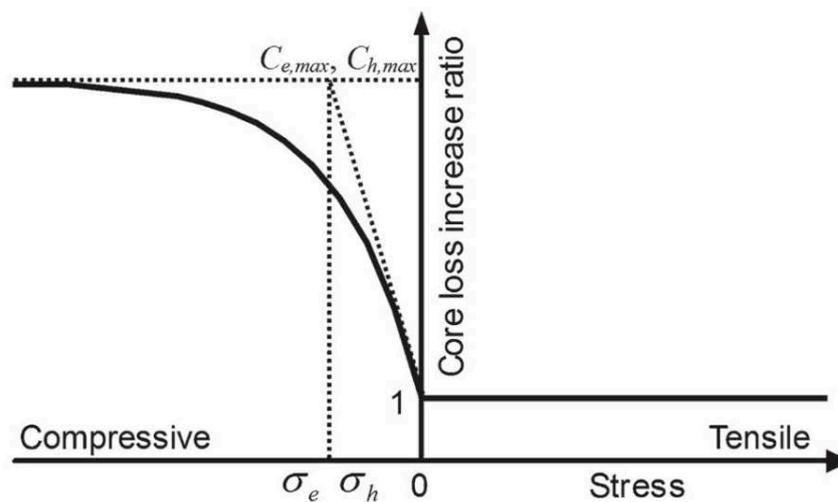
Em 2017, Yamazaki e Takeuchi (2017) também realizaram um estudo sobre o impacto do carregamento mecânico nas características magnéticas de uma máquina síncrona de ímãs permanentes, com destaque para as perdas magnéticas. A abordagem consistiu em modelar fatores de correção para as perdas por histerese ( $C_h$ ) e perdas clássicas ( $C_e$ ), em função do estresse, que compensa, para cada nível de

tensão aplicada, as perdas na condição *stressless*. O estudo faz uso do estresse equivalente  $\sigma_{eq}$ , apresentado por Daniel e Hubert (2010), que leva em conta a direção do vetor indução magnética e do tensor de estresses, de acordo com a Equação (15):

$$\sigma_{eq} = \frac{3}{2} \vec{h}^t \mathbf{s} \vec{h} \quad (15)$$

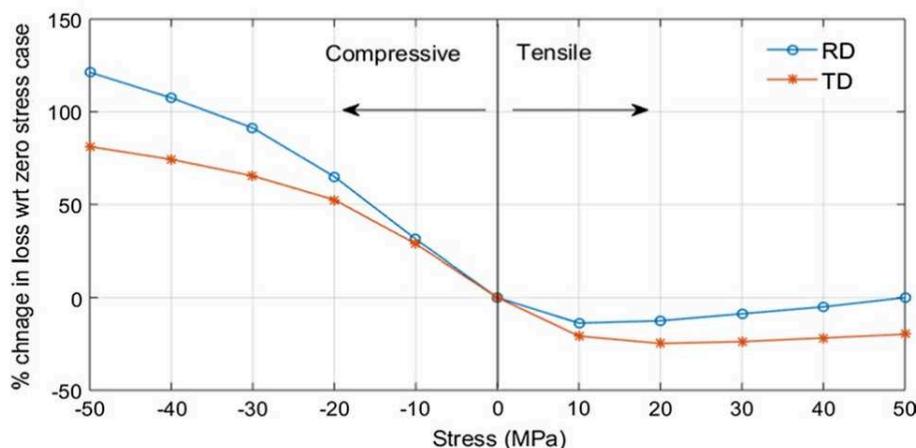
Sendo  $\mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma} - (1/3)\text{Tr}(\boldsymbol{\sigma})\mathbf{I}$  a parte desviante do tensor de estresse e  $\vec{h}$  o vetor diretor unitário do campo magnético do elemento da malha. Nesse trabalho, será considerado que o material ferromagnético utilizado na confecção das chapas do estator possui comportamento isotrópico, o que permite que a aplicação da Equação (15) possa ser realizada utilizando o vetor diretor unitário da indução magnética do elemento da malha,  $\vec{b}$ . A Figura 15 apresenta o comportamento dos fatores de correção  $C_h$  e  $C_e$  para uma faixa de esforços mecânicos de tração e compressão. Percebe-se que a correção é maior para a região de compressão, eventualmente saturando em valores máximos  $C_{h,max}$  e  $C_{e,max}$ . Para a região de tração, o ajuste é tão pouco significativo, que a as perdas em condição *stressless* são mantidas as mesmas, através de uma correção unitária. Esse comportamento também foi apresentado por Baghel, como indica a Figura 16 (BAGHEL *et al.*, 2019).

Figura 15 – Evolução dos fatores  $C_h$  e  $C_e$  segundo o nível de esforço mecânico  $\sigma_{eq}$ .



Fonte – (YAMAZAKI; TAKEUCHI, 2017)

Figura 16 – Alteração percentual nas perdas magnéticas devido a aplicação de tensões de tração e de compressão.



Fonte – (BAGHEL *et al.*, 2019)

Dos estudos apresentados anteriormente, alguns elementos são relevantes para a implementação computacional proposta nesse trabalho. Tem-se, de uma maneira geral, um aumento muito mais expressivo para as perdas magnéticas quando o material está sujeito a esforços de compressão na direção do campo magnético (para materiais com magnetostricção positiva), ocorrendo uma saturação nessas modificações tanto para altos níveis de esforços de compressão, como para tração. Além disso, o uso do estresse equivalente da Equação (15) para contemplar a orientação do tensor de estresses em relação ao campo magnético local nos elementos de uma malha foi a opção escolhida para determinação do esforço  $\sigma$  a ser utilizado na correção das perdas magnéticas no dispositivo adotado neste trabalho.

Dessa forma, o trabalho de modo geral fará uso de dados experimentais, obtidos através de ensaios de amostras submetidas a esforços uniaxiais, dos dados das variações dos parâmetros de modelos de perdas por histerese em função da carga mecânica para adequar os resultados para aplicação em dispositivos reais, que apresentam diversas configurações magnetomecânicas devido à distribuição do tensor de tensões mecânicas. O conceito de estresse equivalente permite determinar um valor de tensão mecânica escalar a partir do tensor de tensões e da orientação do campo magnético local, de modo que a aplicação dessa tensão paralelamente ao campo magnético provocaria um efeito similar que o tensor de tensões gera no comportamento magnético do dispositivo. Portanto, uma simulação mecânica será realizada para determinar a distribuição do tensor de tensões mecânicas, uma simulação magnética determinará a distribuição da indução e do campo magnético, permitindo a obtenção de tensões equivalentes locais que serão aplicadas em conjunto com a indução magnética no modelo de perdas por histerese adotado.

Os conceitos apresentados nesse capítulo contextualizam o impacto que os esforços mecânicos promovem tanto na permeabilidade magnética nos materiais ferromagnéticos como nas perdas magnéticas dos mesmos, além de revisar aspectos fundamentais para o entendimento do restante desse trabalho, tais como as componentes de perdas magnéticas e as possíveis modelagens equacionais das mesmas, bem como conceitos de magnetostricção e acoplamento magnetomecânico. Nesse trabalho, apenas o impacto dos esforços mecânicos sobre as perdas por histerese será aprofundado, de modo que as correções na permeabilidade magnética devido às cargas mecânicas não serão trabalhadas. No próximo capítulo é apresentada a metodologia empregada na implementação computacional proposta para corrigir as perdas por histerese, assim como as etapas de ajuste de curvas dos resultados das amostras ensaiadas e as simulações mecânicas do dispositivo eleito para estudo.

### 3 METODOLOGIA EMPREGADA E GERAÇÃO DOS PRINCIPAIS SUBSÍDIOS

Embora tenha sido visto que os esforços mecânicos impactam tanto as perdas por histerese quanto as perdas dinâmicas (perdas clássicas e excedentes), um trabalho de implementação computacional deve ser realizado por partes, de maneira progressiva, permitindo que possa ser validado e adequado à medida que vai sendo aprimorado. Nessa dissertação de mestrado, apenas a rotina de cálculo das perdas por histerese, original do EFCAD, foi modificada de modo a contemplar a influência dos carregamentos mecânicos. Nesse capítulo será apresentada a metodologia de trabalho implementada, bem como os principais subsídios necessários para a sua execução.

#### 3.1 METODOLOGIA PARA CORREÇÃO DO CÁLCULO DAS PERDAS POR HISTERESE NO EFCAD

Antes de qualquer modificação nas rotinas originais do EFCAD, é preciso entender inicialmente o procedimento original de cálculo das perdas por histerese da ferramenta. As rotinas de cálculo do EFCAD computam as induções magnéticas locais em cada elemento da malha de elementos finitos ( $B_i$ ), ao solucionar as equações diferenciais que regem a física do dispositivo em estudo, fazendo uso das condições de contorno especificadas.

Com a distribuição das induções magnéticas [ $B_i$ ], executa-se, elemento a elemento, o cálculo das perdas por histerese ( $W_{h,i}$ ), através da aplicação da fórmula de Steinmetz (Equação (3)), onde os parâmetros  $K_h$  e  $\alpha$  são fornecidos para cada material através da biblioteca de propriedades dos materiais. Somando-se todas as perdas locais, as perdas totais por histerese são obtidas, para cada região de interesse, após normalização pela frequência  $f$  da fonte de excitação do dispositivo, considerando uma alimentação senoidal pura. A indução  $B_p$  utilizada na fórmula é obtida pelo valor máximo do módulo das induções locais nos elementos, extraídos ao longo do tempo, de acordo com a Equação (16):

$$B_{p,i} = \text{máx} (|B_i(t)|) = \text{máx} (|B_{r,i}(t)\hat{r} + B_{t,i}(t)\hat{t}|) \quad (16)$$

Onde  $B_{r,i}$  e  $B_{t,i}$  são as componentes radiais e tangenciais da indução magnética no elemento  $i$ ,  $\hat{r}$  e  $\hat{t}$  os vetores diretores das respectivas direções. Como ambos os modelos de elementos finitos deste trabalho são em 2D, a componente de indução  $B_{z,i}$  vale 0 T para todos os elementos, em qualquer instante de tempo. As etapas gerais do procedimento descrito acima são ilustradas pela Figura 17.

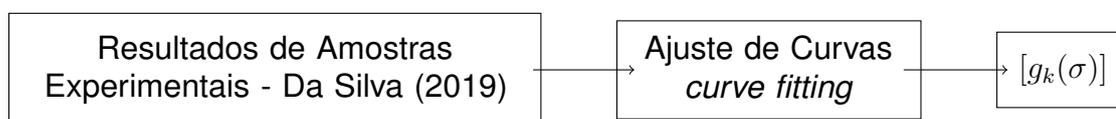
Figura 17 – Etapas originais para o cálculo das perdas por histerese no EFCAD.



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Em relação às etapas originais de cálculo, a primeira modificação realizada diz respeito à formulação das perdas por histerese. Conforme exposto no Capítulo 2, a Equação (4), uma modificação da equação de Steinmetz, possui uma variação mais uniforme de seus coeficientes em função dos níveis de esforços mecânicos aplicados, dentre um conjunto de modelos modificados caracterizados por Da Silva, em sua dissertação de mestrado (DA SILVA, 2019). No entanto, os ensaios realizados continham alguns níveis específicos de tensões mecânicas e deseja-se uma modelagem contínua do comportamento dos coeficientes do modelo de perdas apresentado, visto que os estresses existentes localmente nos elementos de uma malha não têm seus valores conhecidos *a priori*.

Portanto, para os dados experimentais obtidos por Da Silva, deve-se propor um modelo de função  $g(\sigma)$  para cada coeficiente da Equação (4), obtendo um conjunto de funções  $[g_k(\sigma)]$  válido para o intervalo de medições experimentais, mas que permita avaliar o comportamento além desse intervalo. A obtenção das funções é realizada através de um ajuste de curvas, de modo a obter os coeficientes de determinação  $r^2$  o mais próximos da unidade (1,0) possível. A Figura 18 indica as etapas desse procedimento, que gera o primeiro subsídio para a implementação computacional proposta: o conjunto de funções  $[g_k(\sigma)]$ .

Figura 18 – Etapa de obtenção do conjunto  $[g_k(\sigma)]$ , a partir dos resultados experimentais de Da Silva (2019).

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Para o uso adequado das funções  $g_k(\sigma)$  obtidas, deve-se realizar uma simulação mecânica do dispositivo de estudo, de modo a se obter a distribuição de tensões mecânicas ao longo da malha de elementos finitos. Nesse trabalho, empregou-se o uso do GetDP, um *solver* de elementos finitos multi-físico com licença de código aberto, em conjunto com o Gmsh, malhador de elementos finitos que contém funcionalidades de pré e pós-processamento (DULAR *et al.*, 1998; GEUZAIN; REMACLE, 2009). O dispositivo a ser estudado será o estator de uma máquina elétrica, a ser apresentado posteriormente, de modo que a solução do problema será dada em coordenadas cilín-

dricas e os resultados de interesse são os tensores mecânicos  $\sigma_i$ , de cada elemento  $i$  da malha, conforme Equação (17):

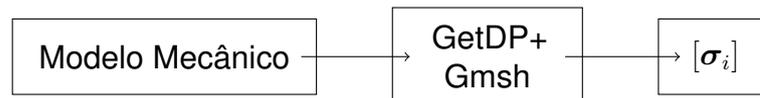
$$\sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_{rr,i} & \sigma_{r\theta,i} & \sigma_{rz,i} \\ \sigma_{\theta r,i} & \sigma_{\theta\theta,i} & \sigma_{\theta z,i} \\ \sigma_{zr,i} & \sigma_{z\theta,i} & \sigma_{zz,i} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Como as simulações serão realizadas através de modelagens 2D, na aproximação das pequenas deformações e considerando tensões planas (assumindo que a estrutura pode se deformar livremente na direção  $z$ , direção de profundidade da peça), aliado ao fato do tensor  $\sigma_i$  ser simétrico, a Equação (17) pode ser simplificada de acordo com a Equação (18):

$$\sigma_i = \begin{pmatrix} \sigma_{rr,i} & \sigma_{r\theta,i} & 0 \\ \sigma_{r\theta,i} & \sigma_{\theta\theta,i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Portanto, os resultados de interesse da simulação mecânica são essencialmente as tensões  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{r\theta}$  para cada elemento da malha, que deve ser rigorosamente a mesma do modelo magnético original, simulado no EFCAD. A Figura 19 ilustra as etapas da simulação mecânica, que propicia o segundo subsídio para a continuação do trabalho: o conjunto de tensores mecânicos  $[\sigma_i]$ .

Figura 19 – Obtenção do conjunto  $[\sigma_i]$ , via simulação mecânica com GetDP e Gmsh.

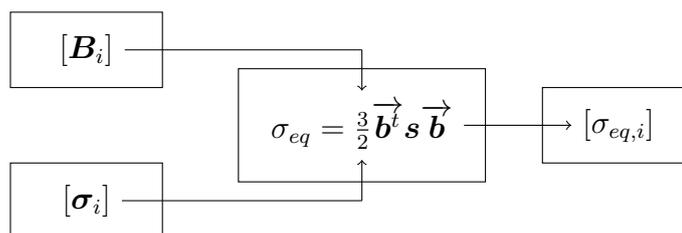


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

As duas etapas anteriores são realizadas fora do ambiente do EFCAD, devido à necessidade de usar uma linguagem de programação diferente (Python) da qual o EFCAD foi escrito (Fortran) e devido à necessidade de simular o modelo mecânico com outra ferramenta de cálculo de elementos finitos (GetDP + Gmsh). Em posse dos conjuntos  $[g_k(\sigma)]$  e  $[\sigma_i]$ , todos os procedimentos seguintes são realizados em sub-rotinas internas aos códigos fontes do EFCAD.

A próxima etapa do processo consiste em utilizar a distribuição de induções magnéticas  $[B_i]$ , obtidas pela simulação magnética original do dispositivo, e o conjunto de tensores mecânicos  $[\sigma_i]$  para computar o conjunto de estresses equivalentes locais em cada elemento da malha  $[\sigma_{eq,i}]$ , de acordo com a formulação de Daniel e Hubert (2010), indicada na Equação (15) e adaptada devido à consideração de que o material possui comportamento isotrópico. A Figura 20 ilustra o procedimento descrito, que ocorre internamente ao EFCAD, através de sub-rotinas escritas em Fortran.

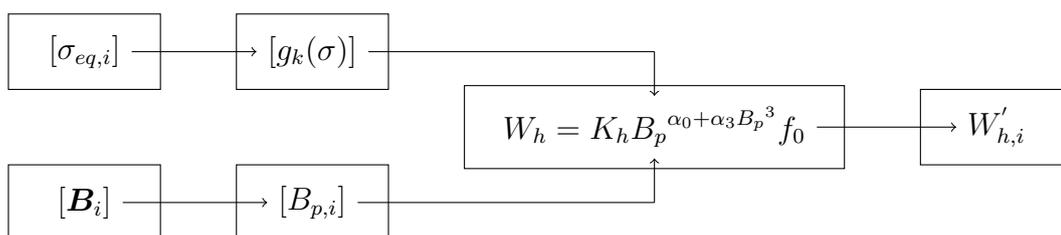
Figura 20 – Procedimento para obtenção do conjunto  $[\sigma_{eq,i}]$ .



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Em posse do conjunto  $[\sigma_{eq,i}]$ , das funções  $[g_k(\sigma)]$  e da distribuição de induções magnéticas  $[B_i]$ , que possibilita calcular o conjunto de induções de pico  $[B_{p,i}]$ , o ajuste nas perdas por histerese pode ser computado, de acordo com a Equação (4), gerando as perdas por histerese corrigidas pelo acoplamento magnetomecânico  $W'_{h,i}$ . A Figura 21 apresenta a etapa final da metodologia implementada computacionalmente nesse trabalho.

Figura 21 – Cálculo das perdas por histerese corrigidas  $W'_{h,i}$ .



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Conforme apresentado acima, as denominadas etapas I (ajuste de curvas  $g(\sigma)$ ) e II (tensores de estresse mecânicos  $\sigma_i$ ) são realizadas externamente ao EFCAD e são processos independentes. As próximas seções apresentam os procedimentos adotados e os resultados obtidos em cada uma delas.

### 3.2 ETAPA I - AJUSTE DE CURVAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O ajuste de curvas dos dados experimentais foi o primeiro processo adotado, por ser a imediata continuação do trabalho de Da Silva (2019). No apêndice D de sua dissertação, Da Silva propôs algumas modelagens de funções  $g(\sigma)$  para os diferentes modelos de perdas de histerese utilizados em seu trabalho. Conforme comentado no Capítulo 2, o modelo de perdas por histerese constituído por uma derivação do modelo de Steinmetz (Equação (4)) foi o modelo escolhido para essa etapa do trabalho. A escolha desse modelo proporciona uma vantagem: de acordo com os resultados de Da Silva (2019), os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  podem ser considerados nulos para toda a faixa

de esforços mecânicos utilizada nos ensaios. Portanto, a Equação (4) é simplificada pela Equação (19), sendo necessário obter funções  $g(\sigma)$  para apenas três parâmetros:  $K_h$ ,  $\alpha_0$  e  $\alpha_3$  (DA SILVA, 2019).

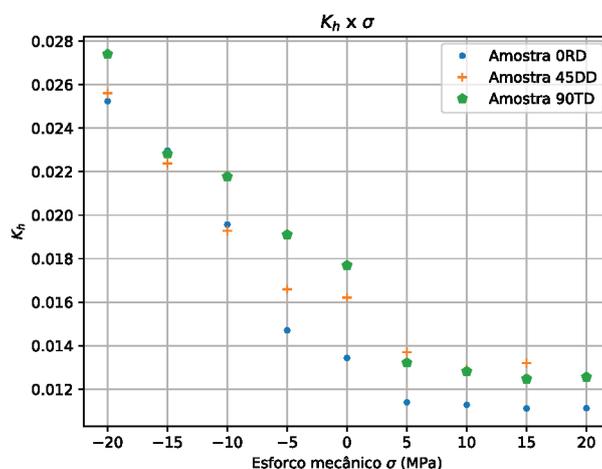
$$W_h = K_h B_p^{\alpha_0 + \alpha_3 B_p^3} f_0 \quad (19)$$

Os ensaios realizados para a obtenção dos dados ocorreram na bancada experimental desenvolvida na tese de doutorado de Mailhé (2018), a qual permite a imposição de esforços mecânicos uniaxiais em um material sujeito a fluxos magnéticos controlados. As chapas de aço E230, para fins elétricos de grão não-orientado (GNO) foram submetidas a carregamentos mecânicos de tração e compressão, em níveis de 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa e 20 MPa, aplicados paralelamente ao campo magnético imposto nas chapas, bem como em uma condição livre de esforços, *stressless*, de 0 MPa. Para cada um desses níveis, variou-se a indução magnética de 0,05 T até 1,5 T (DA SILVA, 2019).

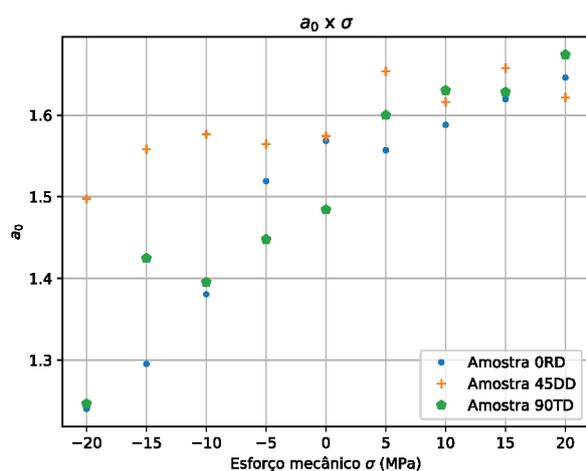
Ao utilizar uma alimentação senoidal de baixa frequência (1 Hz), as perdas totais medidas através do uso da Equação (1) podem ser consideradas apenas como as perdas por histerese, desprezando-se as perdas dinâmicas. Para cada nível de esforço mecânico aplicado, os resultados obtidos pela variação da indução magnética foram submetidos a um procedimento de ajuste de curvas, de modo a se obter os três parâmetros da Equação (19). A Figura 22 apresenta os três parâmetros do modelo obtidos para os diferentes níveis discretos de esforços mecânicos aplicados sobre as amostras. Cada figura possui três conjuntos de pontos devido à variação da direção de corte em relação ao sentido de laminação de 0° (0RD), 45° (45DD) e 90° (90TD) nas amostras de chapas de aço.

O processo de ajuste de curvas para os parâmetros do modelo de perdas por histerese do material inicia com a obtenção das médias dos parâmetros para as três direções de corte em relação às direções de laminações, de modo a reduzir as diferenças existentes entre os conjuntos de pontos obtidos para cada parâmetro. Com os valores médios obtidos, levou-se em consideração a tendência dos parâmetros, assim como uma conclusão do Capítulo 2, de que ocorre uma saturação dos parâmetros quando o nível de esforço mecânico alcança um patamar elevado, para se propor um modelo de função  $g(\sigma)$  que pudesse representar o comportamento dos parâmetros em uma faixa contínua de estresses mecânicos.

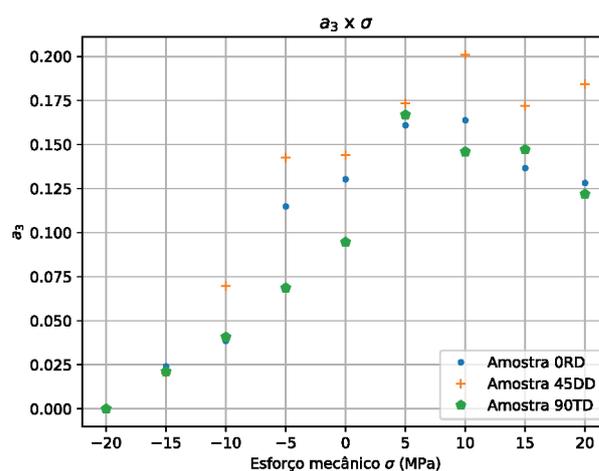
Figura 22 – Dados experimentais dos parâmetros do modelo de perdas por histerese obtidos por Da Silva (2019).



(a) Dados  $K_h \times \sigma$



(b) Dados  $a_0 \times \sigma$



(c) Dados  $a_3 \times \sigma$

Fonte – (DA SILVA, 2019)

A Equação (20) representa a função proposta, que contém sete coeficientes distintos a serem determinados. A função  $g_1(\sigma)$ , para  $K_h$ , apresenta o sinal positivo no segundo termo, enquanto que as funções  $g_2(\sigma)$  e  $g_3(\sigma)$ , para  $a_0$  e  $a_3$ , apresentam o sinal negativo no segundo termo.

$$g_k(\sigma) = c_0 \cdot \text{tg}^{-1}(c_1 \cdot \sigma + c_2) \pm c_3 \cdot \text{tg}^{-1}(c_4 \cdot \sigma - c_5) + c_6 \quad (20)$$

A determinação dos coeficientes  $c_j$  de cada função foi obtida através do uso da biblioteca científica *scipy*, da linguagem de programação Python, e de sua função *curve\_fit* do módulo *optimize*. O uso da função necessita de um conjunto inicial de valores e permite diversas configurações de métodos de obtenção dos parâmetros, limites de variação dos mesmos e número de tentativas de convergência. Maiores

detalhes sobre o módulo da biblioteca podem ser obtidos na referência The SciPy Community (2021). A Tabela 1 apresenta os resultados dos coeficientes obtidos, após a execução do programa de ajuste de curvas, bem como os respectivos coeficientes de determinação  $r^2$  resultantes.

Tabela 1 – Resultado dos coeficientes  $c_j$  e coeficiente de determinação  $r^2$  obtido para as funções  $g_k(\sigma)$  via ajuste de curvas.

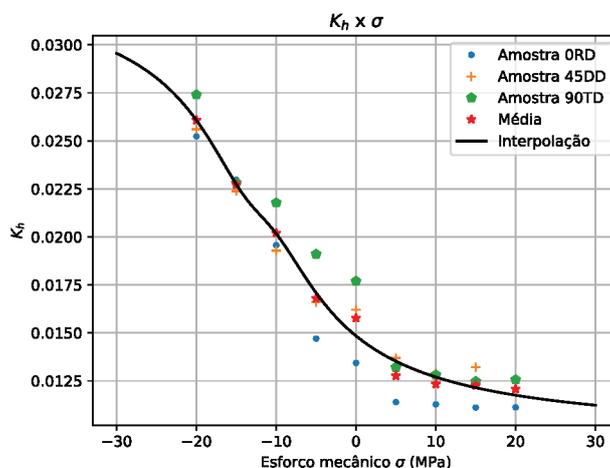
Coeficiente	$g_k(\sigma)$		
	$K_h$	$a_0$	$a_3$
$c_0$	-0,0799	7,0457	0,1010
$c_1$	0,1645	0,1353	0,0863
$c_2$	2,0046	2,1080	0,5571
$c_3$	-0,0723	6,7549	0,0216
$c_4$	-0,1757	0,1400	0,3961
$c_5$	2,1370	-2,1605	5,4053
$c_6$	0,0215	1,2905	0,0537
$r^2$	0,9915	0,9960	0,9892

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

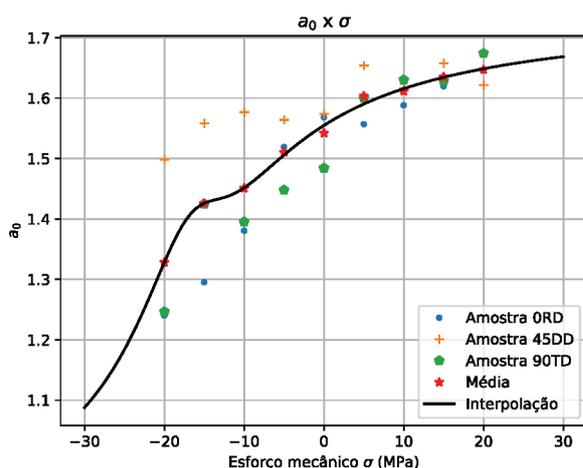
Devido ao fato de que os três coeficientes de determinação  $r^2$  ficaram próximo da unidade (1,0), os ajustes de curvas obtidos através do programa foram considerados satisfatórios, não ocorrendo nenhuma outra alteração de parâmetros da função *curve\_fit*, nem outra modelagem para as funções  $g_k(\sigma)$  foi proposta. A Figura 23 apresenta novamente os resultados experimentais obtidos por Da Silva (2019), porém contém também os valores médios dos parâmetros, utilizados no procedimento de ajuste de curvas, e o traçado das funções  $g_k(\sigma)$  obtidas com os coeficientes da Tabela 1. O domínio utilizado para as funções se estende além da faixa de estresses mecânicos utilizados nos ensaios para que se possa ter uma ideia do comportamento dos parâmetros para níveis maiores de tração e compressão.

Como os ensaios experimentais possuem limitações tanto de esforços mecânicos aplicados quanto dos níveis de induções magnéticas impostas nas amostras, optou-se por realizar uma extrapolação linear dos parâmetros quando utilizados no modelo de perdas por histerese implementado computacionalmente. Assim, quando as perdas por histerese são vistas em função da indução magnética de pico  $B_p$ , com curvas de nível para diferentes carregamentos mecânicos  $\sigma$ , uma aproximação por reta entra em vigor para os traçados a partir de 1,0 T de indução. Em regiões de esforços equivalentes de compressão menores de -20 MPa, ocorre também uma fixação da inclinação da reta usada na extrapolação, pois para esforços menores do que -20 MPa, a inclinação da reta obtida para  $B_p = 1,0$  T apresentou uma tendência de redução de valores.

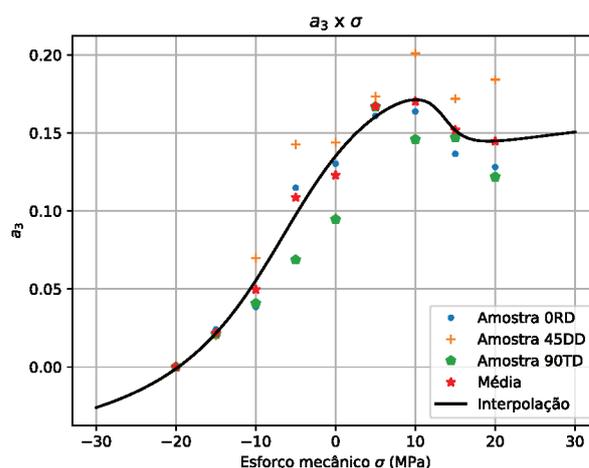
Figura 23 – Traçado das funções  $g_k(\sigma)$  com os coeficientes obtidos via ajuste de curvas.



(a)  $g_1(\sigma) = K_h(\sigma)$



(b)  $g_2(\sigma) = a_0(\sigma)$

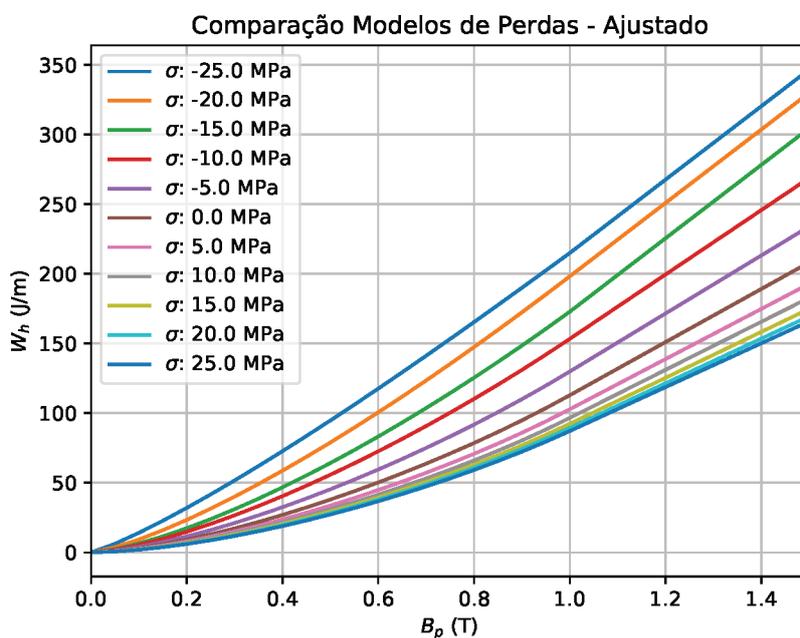


(c)  $g_3(\sigma) = a_3(\sigma)$

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 24 apresenta o resultado do modelo de perdas por histerese da Equação (19) em função da indução magnética para diferentes níveis de esforços mecânicos, já contendo a aproximação por reta descrita acima. Pela figura, e considerando que a amostra de aço E230 possui magnetostricção positiva, o ajuste de curvas realizado para as funções  $g_k(\sigma)$  propostas proporciona o comportamento esperado: os traçados para esforços de compressão (valores negativos em MPa) se encontram em pontos superiores ao traçado do caso *stressless*, e este se encontra em um ponto superior aos traçados para esforços de tração (valores positivos em MPa). Além disso, percebe-se também que o aumento das perdas para esforços de compressão é mais intenso do que a redução nas mesmas para esforços de tração, conforme visto no capítulo anterior.

Figura 24 – Modelo de perdas por histerese ajustado pelos parâmetros dependentes do esforço mecânico.



Os passos apresentados encerram a Etapa I proposta, visto que o conjunto de funções  $[g_k(\sigma)]$  foi obtido para as amostras de lâminas de aço ensaiadas experimentalmente por Da Silva (2019). Os coeficientes obtidos na Tabela 1 para os três parâmetros do modelo de perdas por histerese podem sofrer alterações caso dados experimentais adicionais sejam obtidos, isto é, caso medições de laboratório ocorram em níveis de estresse mecânico dentro da faixa original de -20 MPa até 20 MPa, ou mesmo além dessa faixa, desde que a bancada experimental possibilite ensaios nessas condições. Além disso, a modelagem da função  $g_k(\sigma)$  da Equação (20) também pode ser modificada para um outro tipo de representação. De toda forma, os procedimentos descritos nessa seção contemplam os passos necessários para que se possa obter o conjunto  $[g_k(\sigma)]$ , subsídio fundamental para a continuação do trabalho.

### 3.3 ETAPA II - MODELO MECÂNICO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Embora as Etapas I e II sejam independentes, a escolha de realizar o ajuste de curvas inicialmente foi feita pois a obtenção dos coeficientes das funções  $g_k(\sigma)$  depende apenas dos resultados experimentais das amostras de chapas do material a ser caracterizado. Na Etapa II, em que uma simulação mecânica via método dos elementos finitos será performeda, surge um detalhe adicional: a escolha do dispositivo a ser modelado e simulado, visto que o mesmo modelo e mesma malha de elementos deverão ser empregados na simulação eletromagnética final. A seguir, discorre-se so-

bre o dispositivo eleito para estudo nesse trabalho e, em sequência, são apresentados o respectivo modelo mecânico e seus resultados de simulação.

### 3.3.1 Dispositivo de estudo: *Core Tester*

A necessidade de testar o estator de uma máquina elétrica sem a obrigação de realizar todo o processo de fabricação, sobretudo a etapa de bobinagem dos enrolamentos do estator, concebeu dois trabalhos de dissertação de mestrado no GRUCAD, os quais projetam um dispositivo para testes de núcleo de estatores (*core tester*) e avaliam os resultados de medições em amostras industriais de estatores. O dispositivo concebido permite trocas de núcleos, desde que atendam restrições geométricas do próprio equipamento, o que permite avaliar diferentes conjuntos de estatores, com alterações como material ferromagnético utilizado na fabricação, espessura das lâminas e altura do pacote. A Figura 25 apresenta duas vistas do equipamento projetado, que ilustram a vantagem mencionada da não obrigação de bobinar o estator para realizar as medições. A estrutura existente na região em que comumente se insere o rotor é adaptada para permitir a imposição de campos magnéticos girantes no conjunto como um todo e atua como a alimentação do equipamento (IAMAMURA, 2008; SCHLEGEL, 2011).

Figura 25 – Dispositivo *core tester*, desenvolvido no GRUCAD.



(a) Vista superior

(b) Vista lateral

Fonte – (IAMAMURA, 2008; SCHLEGEL, 2011)

Devido à impossibilidade de separar, experimentalmente, as perdas magnéticas do estator e do testador, uma simulação via elementos finitos foi realizada para avaliar e segregar as componentes das perdas entre cada peça do dispositivo (SCHLEGEL *et al.*, 2012). Constatou-se que as perdas na região do testador não se modificam de maneira significativa mesmo para níveis de correntes elétricas distintos (permanecendo sempre

em cerca de 20% das perdas totais calculadas para diferentes níveis de corrente), o que permite que as perdas magnéticas de diferentes núcleos de estatores possam ser obtidas através desse procedimento de separação de perdas entre os componentes do estator e do elemento testador (“rotor”). Portanto, o dispositivo *core tester* apresentado foi eleito para esse trabalho em razão da seguinte lista de características e facilidades:

- i) Não é necessário projetar nenhum dispositivo de medição das perdas nos núcleos de estatores. Todo o aparato, a instrumentação eletrônica e instrumentos virtuais (VI) de tratamento das medições já estão disponíveis no GRUCAD.
- ii) O dispositivo já foi simulado computacionalmente via método dos elementos finitos. Uma malha de elementos já se encontra disponível para uso na simulação mecânica e posterior acoplamento.
- iii) As perdas no componente testador podem ser separadas das perdas no núcleo do estator. Dessa forma, o impacto gerado por qualquer esforço mecânico aplicado no conjunto estatórico poderá ser avaliado pelo dispositivo.
- iv) A região externa do estator é totalmente acessível. Um dispositivo que permite aplicar e medir os esforços mecânicos no núcleo do estator pode ser projetado para comparação de resultados experimentais com os obtidos na implementação computacional desse trabalho.
- v) Diferentes conjuntos de estatores podem ser estudados, visto que não é necessário bobinar o estator para uso no dispositivo. Assim, alterações de materiais, espessuras de lâminas e alturas de pacote podem ser realizadas rapidamente.

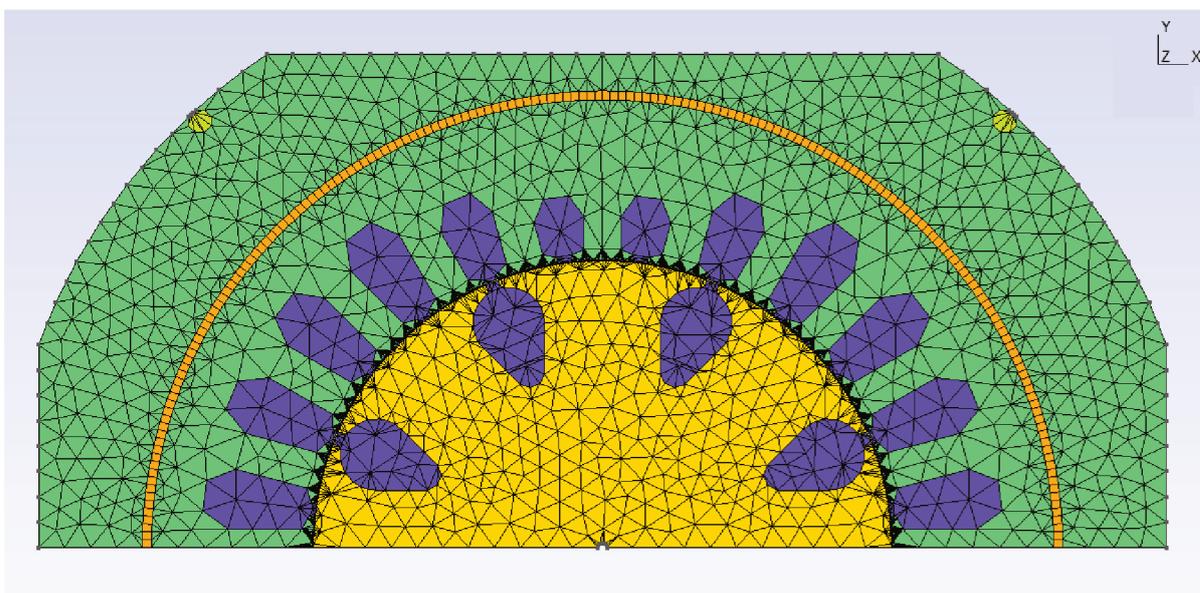
### 3.3.2 Modelo de simulação mecânica

Conforme apresentado no item (ii) da lista anterior, a existência de um modelo computacional de elementos finitos do dispositivo eleito proporciona uma facilidade para a criação e simulação do modelo mecânico. Inicialmente, uma nova malha de elementos finitos foi gerada para o modelo, de modo a garantir um refinamento satisfatório para ambos os modelos (eletromagnético e mecânico). Utilizando o módulo MESH do conjunto de softwares do EFCAD, um arquivo de malha foi exportado, contendo informações relevantes, como número de nós e elementos, coordenadas geométricas, conexão dos nós e índices de materiais para cada elemento, bem como as existentes condições de contorno e seus valores.

Contudo, embora tal arquivo contém todas as informações pertinentes, não é esperado que o mesmo será lido adequadamente pelo software Gmsh, responsável pelo tratamento da malha de elementos finitos a ser utilizada pelo *solver* mecânico elaborado no GetDP. Dessa forma, a primeira etapa da simulação mecânica consistiu

em elaborar um programa, em Python, que permitisse uma conversão entre os dois tipos de arquivos de malha de maneira genérica, possibilitando o emprego do mesmo para qualquer outro dispositivo em que estudos de acoplamento magnetomecânico serão realizados. O resultado é apresentado na Figura 26, que ilustra a malha de elementos finitos do *core tester* já importada na interface do GetDP, após execução do programa de conversão. As diferentes regiões são indicadas através da coloração, em função do material atribuído no arquivo de malha do EFCAD, o que também facilita as definições de regiões no arquivo de simulação do GetDP.

Figura 26 – Malha de elementos finitos do *core tester*, importada no GetDP.



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

No que diz respeito ao *setup* do modelo, algumas considerações foram feitas para facilitar a simulação e leitura posterior dos resultados pelo EFCAD. A própria malha importada indica que o modelo é simulado fazendo uso de uma simetria em relação ao eixo cartesiano horizontal (eixo  $x$ ). Como esforços mecânicos poderão ser aplicados apenas na região do estator, essa peça do dispositivo, indicada pela região verde e banda laranja de elementos quadrangulares da Figura 26, constitui a parte relevante do domínio de cálculo. Dessa forma, as componentes do tensor de tensões  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{r\theta}$  deverão ser zero em todas as outras regiões, o que implicará em uma tensão equivalente,  $\sigma_{eq}$ , nula nas mesmas e as eventuais perdas por histerese calculadas na região do testador (“rotor”) não sofrerão alterações, o que é coerente com a condição mecânica simulada.

Para o problema de elasticidade a ser resolvido pelo GetDP, os módulos de Young dos materiais são fornecidos no arquivo de simulação, bem como condições de contorno que fixam o dispositivo em pontos específicos, de modo que os desloca-

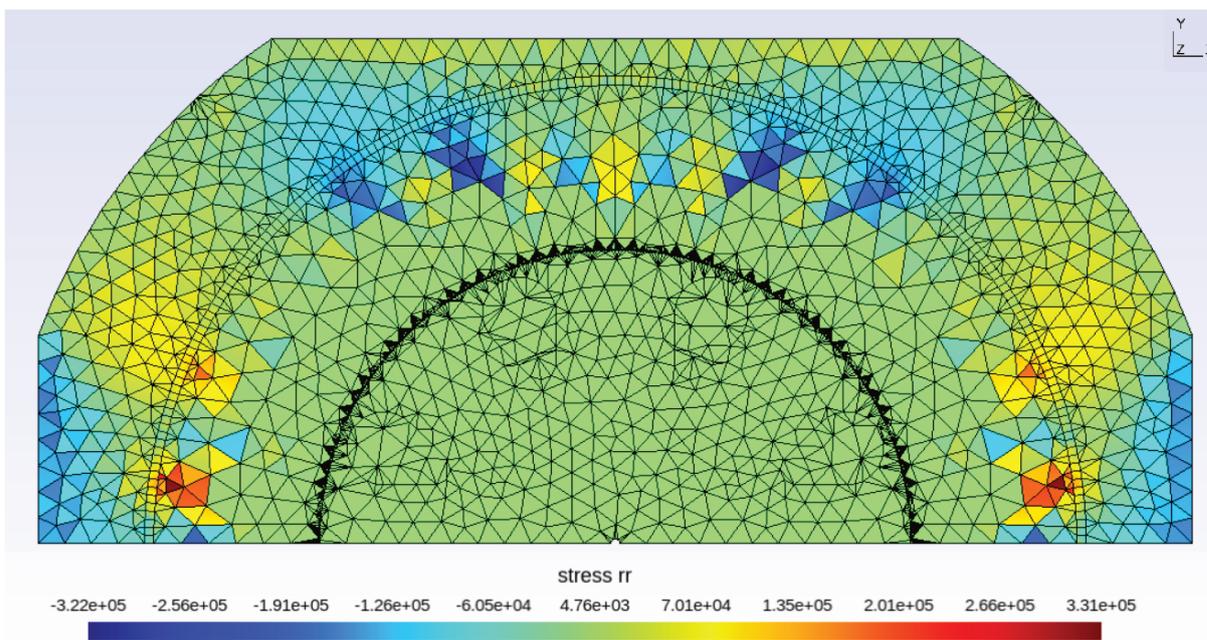
mentos ocorrem em relação aos mesmos. Nas seções retas do exterior do estator são definidas densidades de forças que podem ser aplicadas através de fatores multiplicativos, permitindo condições de carga mecânica de intensidade e natureza (tração ou compressão) distintas. Por fim, o modelo de simulação mecânica grava os valores de  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$  e  $\sigma_{r\theta}$ , elemento a elemento, em um arquivo de saída. Dessa forma, na estrutura interna do EFCAD, pode-se facilmente ler as informações no formato matricial da Equação (18), o que gera o segundo subsídio para a continuação do trabalho: o conjunto  $[\sigma_i]$ .

### 3.3.3 Resultados de simulação - Caso Fx

Nesse trabalho, realizou-se apenas três simulações mecânicas à título de validar a implementação computacional para os casos elementares: compressão horizontal do estator (Caso Fx), compressão vertical do estator (Caso Fy), compressão multi-axial uniforme horizontal e vertical (Caso Fx+Fy). Conforme comentado anteriormente, o modelo mecânico foi elaborado para permitir inúmeras condições de carregamentos mecânicos, que serão combinações lineares dos dois primeiros casos elementares, visto que o Caso Fx+Fy já se trata de uma combinação deles. Esse trabalho apresenta com mais detalhe os resultados do Caso Fx, porém o Apêndice A contém os resultados do Caso Fy e Caso Fx+Fy. Para todas as simulações, a densidade de força padrão a ser aplicada é de  $\rho = 1,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ .

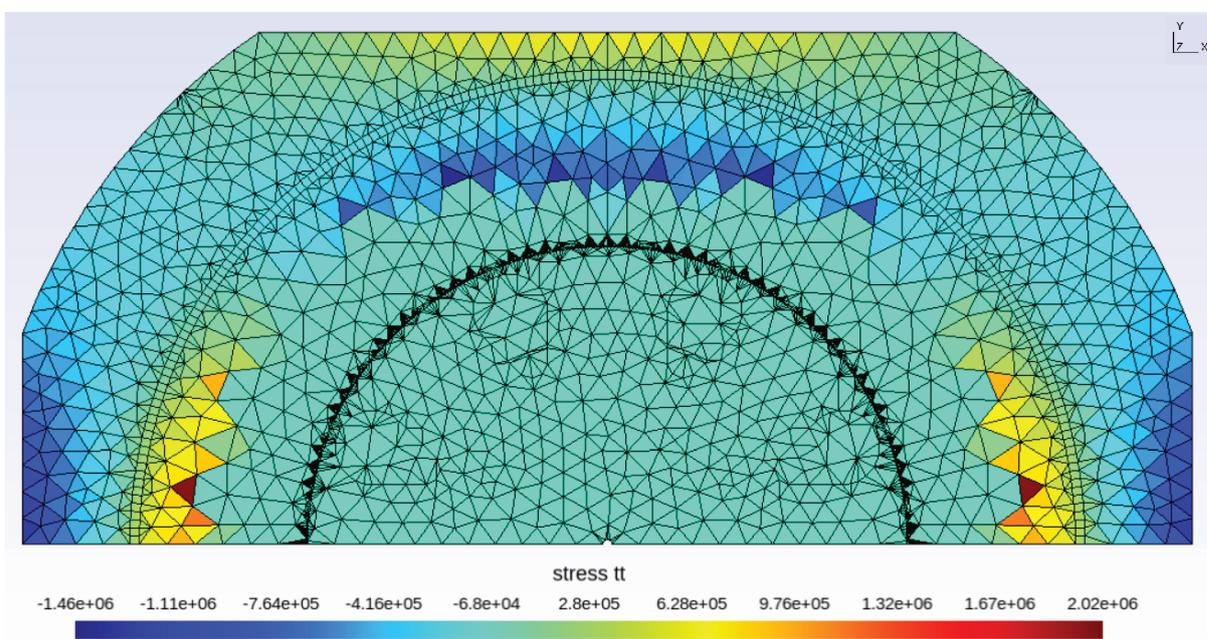
Na Figura 27 e Figura 28 estão apresentados os resultados de simulação para as tensões  $\sigma_{rr}$  e  $\sigma_{\theta\theta}$ , respectivamente. Ambas apresentam uma distribuição, de um modo geral, simétrica de esforços na região do estator e possuem esforços nulos em todas as outras partes do dispositivo, conforme esperado. De acordo com a Equação (15) para o estresse equivalente  $\sigma_{eq}$ , uma análise apenas da distribuição individual dos esforços não permite conclusões mais aprofundadas, visto que não se tem conhecimento da distribuição de induções magnéticas nos elementos da malha. No entanto, pode-se perceber que os valores mínimo e máximo dos esforços  $\sigma_{\theta\theta}$  são cerca de cinco vezes maiores (em módulo) do que os esforços máximo e mínimo de  $\sigma_{rr}$ .

Figura 27 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{rr}$ .



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 28 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{\theta\theta}$ .

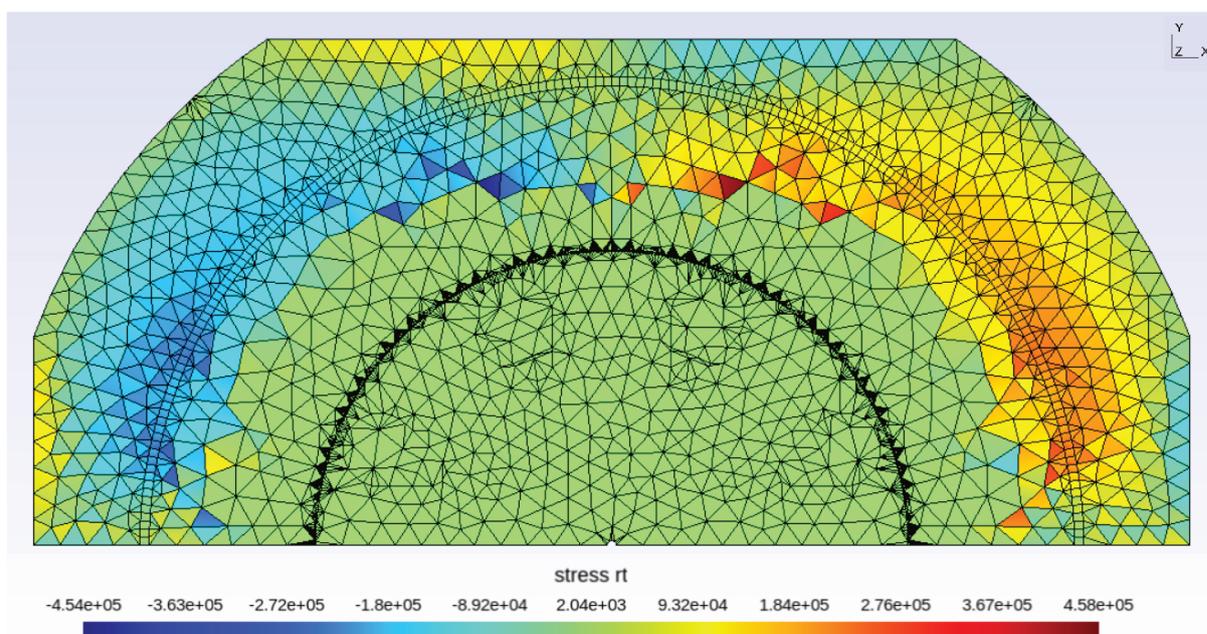


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

O último componente mecânico de interesse, o estresse  $\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r}$ , é apresentado na Figura 29. Ele também apresenta uma distribuição aproximadamente simétrica, porém com inversão de valores entre o eixo de simetria (eixo vertical ou eixo  $y$ ). Novamente, maiores conclusões não podem ser retiradas de imediato devido ao desco-

nhecimento da distribuição das induções magnéticas, a ser obtida no próximo capítulo. Porém, percebe-se que os valores mínimo e máximo dos esforços  $\sigma_{r\theta}$  são maiores (em módulo) do que os valores dos esforços  $\sigma_{rr}$  e menores (em módulo) do que os valores dos esforços  $\sigma_{\theta\theta}$ . Além disso, fora da região de maior interesse (estator do *core tester*), os esforços  $\sigma_{r\theta}$  também são nulos, conforme a natureza dessa simulação mecânica.

Figura 29 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{r\theta}$ .



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

A obtenção das distribuições dos esforços apresentadas acima, bem como o arquivo de texto que contém os valores dos esforços elemento a elemento, permite que o segundo subsídio desse trabalho, o conjunto  $[\sigma_i]$ , possa ser gerado. A conclusão das Etapas I e II apresentadas anteriormente encerra os procedimentos realizados externamente ao EFCAD e finaliza esse capítulo do trabalho. No próximo capítulo será apresentado o modelo magnético do dispositivo eleito para estudo, bem como os resultados de simulação após a implementação computacional da correção das perdas por histerese devido ao acoplamento magnetomecânico.

Um detalhe a ser mencionado é o fato de que, de modo a obter resultados expressivos das alterações nas perdas por histerese obtidas pelas simulações magnéticas, o que permitiria identificar as alterações em futuros ensaios experimentais a serem desenvolvidos, uma modificação no nível dos estresses equivalentes é feita internamente dentro das rotinas desenvolvidas no EFCAD, multiplicando-se por cinquenta (50) os estresses equivalentes obtidos com os dados fornecidos pela simulação mecânica apresentada nesse capítulo. Na prática, devido ao problema mecânico ser linear, o impacto seria o mesmo caso o modelo mecânico fosse simulado com uma densidade superficial de força  $\rho' = 50 \cdot \rho = 7,5 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ , o que também faria as escalas das figuras apresentadas acima serem modificadas por um fator de 50.

#### 4 MODELO MAGNÉTICO E IMPLEMENTAÇÃO DO ACOPLAMENTO MAGNETO-MECÂNICO NO EFCAD

Após a execução e análise dos resultados obtidos nas etapas I e II, a implementação final acontece internamente aos códigos fontes originais do EFCAD. Nesse trabalho, apenas as rotinas relativas ao cálculo eletromagnético transiente com rotação de uma banda de movimento do modelo e cálculo das perdas (módulo EFCM do programa) foram modificadas. Nesse módulo, é possível calcular as perdas geradas pelos campos alternantes, bem como perdas originadas pelos campos rotacionais que podem surgir na operação do dispositivo. Porém, de acordo com a Figura 30 (simuladas em condições iguais ao do primeiro caso a ser apresentado a seguir), as perdas geradas por campos rotacionais no *core tester* escolhido para estudo são expressivamente menores do que as perdas geradas pelos campos alternantes. Na Figura 30a, as perdas por histerese computadas foram de 9.86 W, em comparação com as perdas por histerese de 10.28 W computadas na simulação da Figura 30b. Dessa forma, as perdas devido aos campos rotativos representam uma parcela de 4.25% em relação às perdas devido aos campos alternantes. Portanto, as alterações das rotinas visam modificar apenas as perdas por histerese originadas pelos campos alternantes que circulam na peça.

Figura 30 – Comparação de perdas considerando o cálculo sem campos rotativos e com campos rotativos.

**Total Losses (Instantaneous Inductions) :**

```
Tot.Weight = 0.4238E+01 kg
Eddy Curr. = 0.8650E+01 Watts
Anomalous  = 0.0000E+00 Watts
Hysteresis = 0.9861E+01 Watts
TOTAL      = 0.1851E+02 Watts
```

(a) Perdas no *core tester* devido apenas aos campos alternantes

**Total Losses (Instantaneous Inductions) :**

```
Tot.Weight = 0.4238E+01 kg
Eddy Curr. = 0.8650E+01 Watts
Anomalous  = 0.0000E+00 Watts
Hysteresis = 0.1028E+02 Watts
TOTAL      = 0.1893E+02 Watts
```

(b) Perdas no *core tester* devido aos campos alternantes e rotativos

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Da concepção do dispositivo, tem-se a definição de quatro enrolamentos distintos, dos quais são responsáveis pela alimentação da peça, originando o campo magnético girante na região do estator, enquanto que os outros dois remanescentes são enrolamentos de medição e permanecem em circuito aberto durante a operação. Os enrolamentos primários, de alimentação, são excitados por formas de ondas defasadas em  $90^\circ$  elétricos entre si, de modo a garantir a operação adequada do *core tester* (IAMAMURA, 2008; SCHLEGEL, 2011). Uma simulação estática foi realizada, usando o módulo EFCS, de modo a extrair algumas grandezas de interesse para configuração da simulação transiente, a ser realizada com o módulo EFCM. A Tabela 2 contém os parâmetros de interesse para essa análise, onde as resistências das bobinas são dados fornecidos pelo usuário e as indutâncias foram desnormalizadas pela profundidade da peça,  $z = 0.055$  m (simulações 2D fornecem a maioria das grandezas normalizadas pela profundidade do dispositivo). A indutância mútua  $M$  teve valor expressivamente

Tabela 2 – Características do dispositivo *core tester*.

$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$M$ [mH]	$R_1 = R_2$ [ $\Omega$ ]	$\tau = L_1/R_1 \approx L_2/R_2$ [s]	$5\tau$ [s]
63.58	63.03	0.76	1.2	0.053	0.265

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

menor do que as indutâncias próprias  $L_1$  e  $L_2$ , pois na concepção do dispositivo as duas bobinas do enrolamento primário são dispostas em defasagem de  $90^\circ$  mecânicos, o que as desacopla magneticamente, resultando em uma indutância mútua próxima de zero. Pelo valor de  $5\tau$ , o tempo de simulação padrão adotado de 0.3s fornece confiabilidade de que o sistema entrará em regime permanente, possibilitando que as análises ocorram sem efeitos transitórios.

De modo a permitir simulações com alimentações não senoidais, o EFCAD permite que o usuário escolha entre dois tipos distintos de cálculo de perdas por histerese: uma metodologia de cálculo que não leva em conta a composição harmônica da forma de onda (NH), usando diretamente a forma de onda da indução, e uma metodologia de cálculo que efetua uma análise harmônica da alimentação imposta (H). Em suma, ambas as metodologias seguem os procedimentos apresentados no início da Seção 3.1. A diferença da metodologia harmônica consiste no fato de que uma análise de Fourier é realizada (através do uso de uma FFT - *Fast Fourier Transform*) e, para cada harmônico, a amplitude e fase correspondente são usadas na composição da forma de onda no tempo. Essa onda é avaliada pela Equação (16) para obtenção do valor de pico, posteriormente aplicado na equação de Steinmetz. Então, as perdas obtidas, harmônico por harmônico, são compostas para a obtenção das perdas por histerese totais. Caso a decomposição harmônica não ocorra (metodologia NH), apenas o pico da forma de onda composta é levado em consideração na aplicação da fórmula de Steinmetz, o

que tende a resultar em menores perdas, por não levar em conta os possíveis laços menores na curva BH, que são considerados pela metodologia H. A metodologia de cálculo que realiza uma decomposição harmônica do sinais também é útil quando simulações não-lineares são realizadas, visto que as induções magnéticas podem apresentar componentes harmônicas devido à saturação do material ferromagnético.

Considerando que a implementação computacional foi realizada de modo a contemplar todas as possibilidades de cálculo existentes no módulo EFCM, o seguinte conjunto de simulações foi avaliado para verificação das alterações realizadas nas rotinas originais do EFCAD:

a) Lineares:

- Senoidal, metodologia não harmônica (NH).
- Senoidal, metodologia harmônica (H).
- Sinal composto de harmônicos, metodologia não harmônica (NH).
- Sinal composto de harmônicos, metodologia harmônica (H).

b) Não-Lineares:

- Senoidal, metodologia não harmônica (NH).
- Senoidal, metodologia harmônica (H).

Semelhante ao apresentado no capítulo anterior, os resultados a seguir são relativos ao caso Fx de carga mecânica (compressão horizontal da peça). Os resultados relativos aos casos Fy e FxFy também se encontram no Apêndice A. O módulo EFCM realiza o cálculo das perdas (quando requisitado) apenas no último período da simulação, garantindo que o mesmo ocorra com as grandezas já em regime permanente. Dos diversos resultados que podem ser obtidos ao final da simulação, os de maior interesse para validação desse trabalho são:

- i) Forma de onda da indução em um elemento do estator:  $B(t)$ .
- ii) Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$ , obtidos para cada elemento na malha do estator.
- iii) Tabela comparativa das perdas por histerese no estator entre a condição sem esforços mecânicos (*stressless*) e a condição que leva em conta os resultados do cálculo mecânico realizado no Capítulo 3.
- iv) Distribuição da diferença percentual de perdas por histerese em cada elemento da malha do estator.

#### 4.1 SIMULAÇÕES LINEARES

Para as simulações lineares, os resultados são agrupados de acordo com a natureza da alimentação aplicada nos enrolamentos: senoidal ou com sinal composto de

harmônicos. Para cada alimentação, os distintos métodos de cálculo (não harmônico e harmônico) são aplicados, de modo a se avaliar o impacto da decomposição harmônica no cálculo das perdas, corrigidas pelo acoplamento magnetomecânico implementado em rotinas adicionais inseridas nos códigos fontes do EFCAD.

#### 4.1.1 Alimentação Senoidal

A excitação para as simulações senoidais consiste em definir as seguintes tensões para os dois enrolamentos primários:

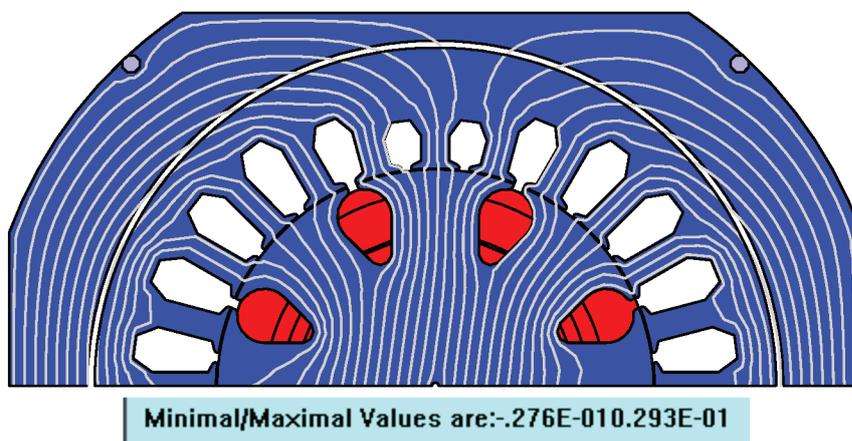
$$V_1(t) = 120 \cdot \sin(2\pi \cdot 60t) \text{ [V]}$$

$$V_2(t) = 120 \cdot \sin(2\pi \cdot 60t - \pi/2) \text{ [V]}$$

Nesse caso em particular de alimentação e considerando a condição de solução linear, espera-se que quando o sistema atingir o regime permanente as induções obtidas também sejam senoidais. Além disso, a decomposição harmônica de um sinal senoidal contendo apenas um harmônico deve ser igual ao próprio sinal original, com amplitude igual ao pico da senóide e fase correspondente ( $0^\circ$  e  $-90^\circ$  para  $V_1(t)$  e  $V_2(t)$  apresentados acima). Nesse caso, os resultados numéricos obtidos para as simulações lineares com alimentação senoidal devem ser próximos entre si, diferindo apenas devido aos erros numéricos inerentes aos procedimentos computacionais e da decomposição harmônica do sinal.

De modo a facilitar a interpretação dos mapas de estresses equivalentes que serão apresentados, extraiu-se nessa primeira simulação uma carta das linhas de fluxo magnético, fornecendo uma ideia da orientação do vetor de indução magnética no dispositivo, relevantes para a obtenção do  $\sigma_{eq}$ , localmente em cada elemento. A Figura 31 apresenta o mapa das linhas de fluxo magnético para o instante 0.12 segundos de simulação.

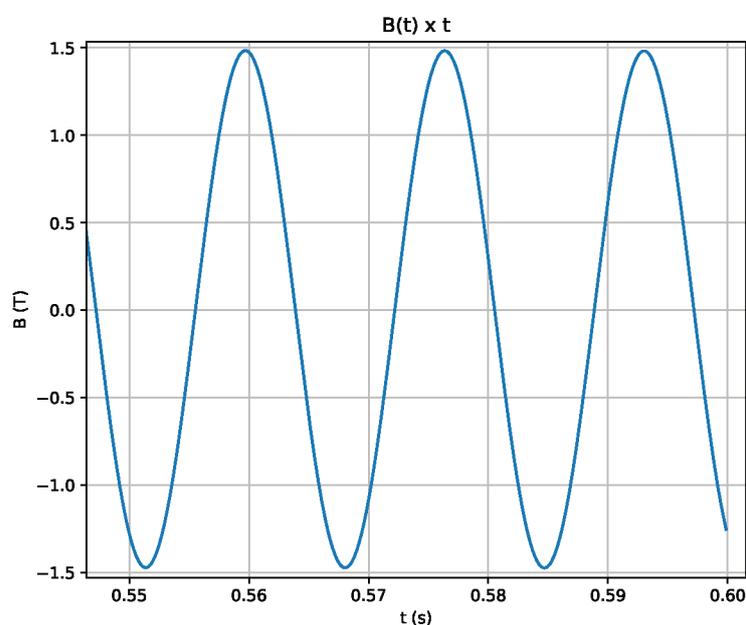
Figura 31 – Distribuição das linhas de fluxo magnético em  $t = 0.12$  s.



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Embora tenham sido realizadas duas simulações para cada método de cálculo de perdas (NH e H), a curva de indução resultante obtida pelo módulo EFCM é dependente apenas das características de excitação do dispositivo. Portanto, apenas três curvas de indução serão apresentadas para cada condição de carga mecânica simulada. A Figura 32 apresenta o resultado da indução tangencial  $B_t(t)$  em um elemento do estator ao longo do tempo. O EFCM computa e gera arquivos de curvas contendo as induções radiais, tangenciais e o módulo resultante. Nesse elemento em particular, a indução tangencial é mais expressiva do que a indução radial, razão pela qual foi eleita para compor a figura. A indução obtida apresenta forma senoidal, como havia sido esperado.

Figura 32 – Indução tangencial  $B_t(t)$  em um elemento do estator do *core tester*.

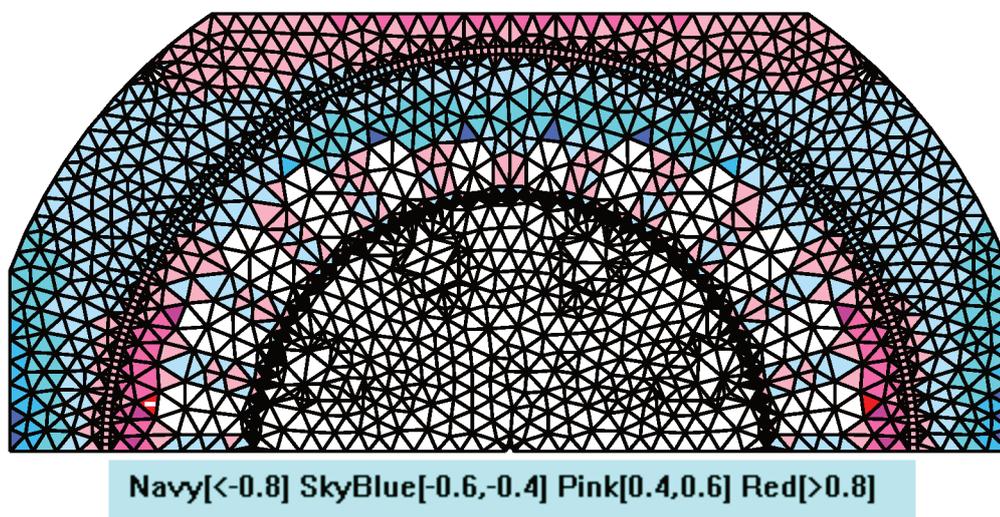


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Para os métodos de cálculo não-harmônico e harmônico, o mapa da distribuição dos estresses equivalentes para cada elemento da malha do estator é obtido após o cálculo magnético (procedimento *a posteriori*). A orientação do vetor diretor da indução, utilizada no cálculo do estresse equivalente, é obtida ao se normalizar o vetor de indução no instante que seu módulo é máximo no elemento. Considerando a simulação linear com alimentação senoidal, espera-se que os resultados sejam semelhantes, ainda que os valores locais dos estresses possam ser diferentes devido à presença de erros numéricos nos cálculos computacionais. As Figura 33 e Figura 34 apresentam as distribuições de estresses equivalentes para os métodos de cálculo não-harmônico e harmônico, respectivamente. Conforme indicado, a escala de cores nos elementos coincide em ambas as figuras, ainda que possa existir diferença de valores, conforme será apresentado. Portanto, no contexto dessa simulação em particular, a implementa-

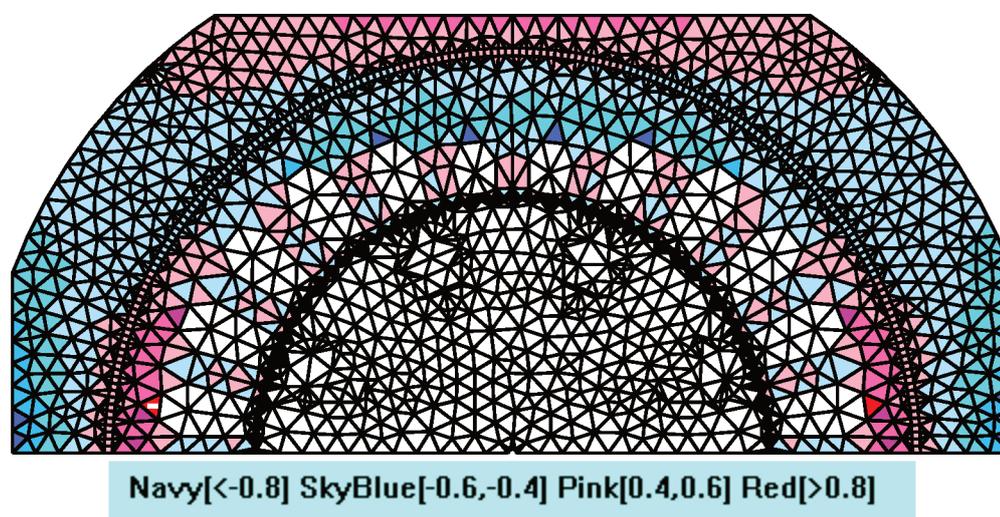
ção computacional tanto na metodologia não-harmônica como na harmônica apresenta indícios de ter sido devidamente realizada.

Figura 33 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 34 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

A escala de cores indicada em ambas as figuras representa os valores dos estresses equivalentes normalizados (sistema pu), onde o valor base consiste no valor absoluto máximo de estresse equivalente,  $\sigma_{eq,max} = \max\{|\sigma_{eq,i}|\}$ , em cada distribuição. Para a Figura 33, o valor base é  $\sigma_{eq,max} = 96.155$  MPa, sendo esse o mesmo valor base da Figura 34. Embora os valores máximos obtidos tenham sido numericamente iguais, espera-se apenas que os resultados sejam próximos, pois cada metodologia de cálculo implica nos seus erros numéricos individuais. Uma análise das distribuições

permite concluir que existem localmente estresses equivalentes tanto de tração como de compressão. Globalmente, há uma predominância de esforços de compressão equivalente sobre o dispositivo o que indica, segundo a Figura 24, que um aumento nas perdas por histerese deve ser numericamente obtido. A região mais próxima da aplicação da força mecânica apresentou a maior concentração de esforços locais de compressão, em coerência com a natureza da carga aplicada.

A Tabela 3 apresenta os resultados numéricos das perdas por histerese obtidos pelas simulações, considerando os métodos de cálculo não-harmônico e harmônico. Nela,  $W_h^o$  representa as perdas por histerese obtidas desconsiderando o acoplamento implementado ( $\sigma_{eq,i} = 0 \text{ MPa}, \forall i$ ),  $W_h'$  indica as perdas por histerese corrigidas pelo acoplamento magnetomecânico e  $\Delta W_h$  representa a diferença percentual entre as duas perdas, normalizada por  $W_h^o$ . O módulo EFCM também computa as perdas na região do “rotor” do dispositivo, de modo a garantir que a diferença entre o caso *stressless* e o caso com acoplamento magnetomecânico seja zero, visto que a carga mecânica é aplicada apenas no estator e não há transmissão de esforços entre os dois meios.

Tabela 3 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso linear com alimentação senoidal.

Meio	Não-harmônico			Harmônico		
	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]
Estator	48.44	56.29	16.02	48.29	56.05	16.06
Rotor	19.25	19.25	0.00	19.20	19.20	0.00

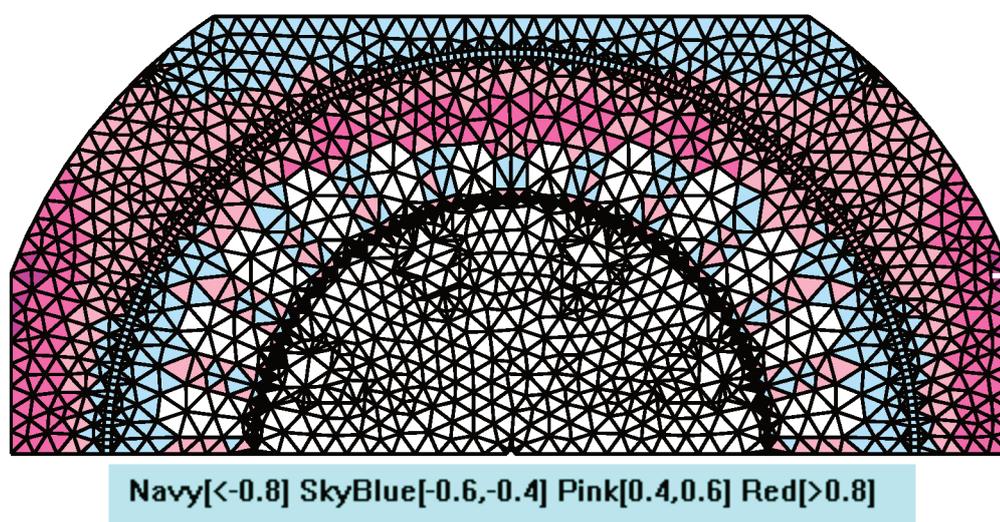
Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Os resultados da tabela confirmam o aumento de perdas por histerese devido ao esforço de compressão horizontal aplicado no dispositivo, de acordo com o esperado pela distribuição de estresses equivalentes. Além disso, os métodos não-harmônico e harmônico geram resultados semelhantes, porém numericamente diferentes, conforme havia sido comentado anteriormente.

A Tabela 3 sintetiza os resultados para os dois meios de interesse, mas uma visualização, elemento a elemento, da diferença das perdas (positiva ou negativa) pode ser realizada, de modo a verificar o impacto de cada estresse equivalente computado localmente. A Figura 35 apresenta a diferença de perdas por histerese local,  $\Delta W_{h,i}$ , em cada elemento do estator, para o método de cálculo não-harmônico. Como a Figura 33 apresenta estresses tanto de compressão como de tração, é coerente que ocorram diferenças positivas (aumento de perdas) como diferenças negativas (redução de perdas) na Figura 35. De fato, é esperado que a Figura 35 seja uma distribuição “dual” à distribuição da Figura 33, onde para cada tom de azul em uma figura, encontre-se um tom de vermelho na outra e vice-versa, conforme previsto pela Figura 24.

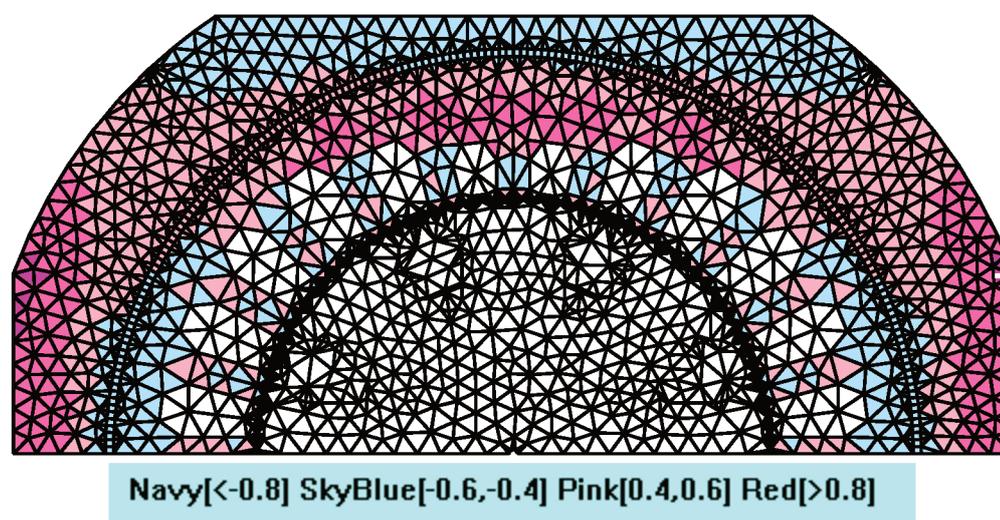
A Figura 36 apresenta um resultado semelhante ao da Figura 35, realçando o fato de que para uma alimentação senoidal pura, os métodos não-harmônico e harmônico devem apresentar resultados próximos entre si. Uma diferença em relação às distribuições de estresses equivalentes consiste no fato de que não se faz uma normalização dos valores pelo máximo de diferença de perdas, mas sim pelo valor de base constante e igual a cem (100). Dessa forma, a escala de cor associada às figuras, embora tenha as mesmas divisões, indica valores percentuais (%), assim como apresentado na Tabela 3.

Figura 35 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 36 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

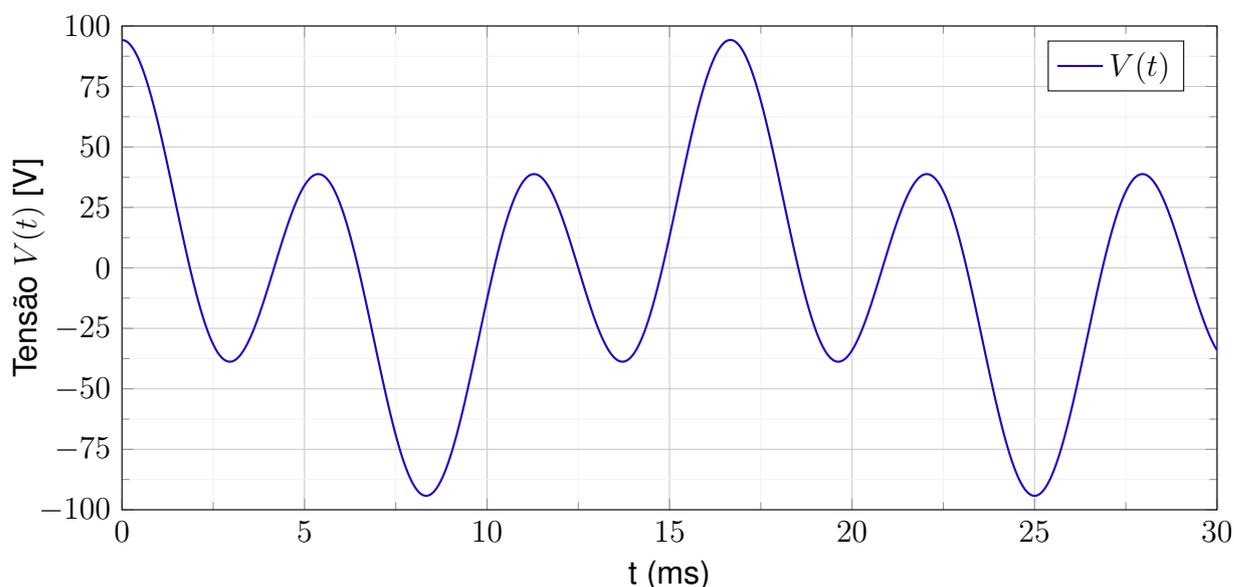
Muito embora a coletânea de resultados obtidos acima indica uma implementação adequada da correção das perdas por histerese, a simulação linear com alimentação senoidal pura é um caso particular e bem comportado, tanto do ponto de vista da excitação como do ponto de vista da ausência de saturação no material, o que caracteriza condições ideais de operação. Dessa forma, de modo a validar a implementação computacional proposta de uma maneira ampla, outras condições não idealizadas precisam ser verificadas, como a próxima simulação apresentada a seguir.

#### 4.1.2 Alimentação Composta de Harmônicos

Conforme exposto anteriormente, quando os dispositivos simulados no EFCAD são alimentados por sinais compostos de diferentes harmônicos, uma decomposição do espectro do sinal pode ser executada (análise de Fourier) e para cada harmônico é realizado o procedimento do cálculo das perdas por histerese utilizando o modelo de Steinmetz. Ao final, as perdas totais consistem na composição das perdas obtidas individualmente para cada frequência que compõe a forma de onda original. Dessa forma, a implementação realizada deve corrigir as perdas por histerese obtidas harmônico por harmônico, através da formulação adaptada do modelo de Steinmetz, com os parâmetros obtidos de acordo com o nível de estresse equivalente local em cada elemento da malha do estator.

Caso a forma de onda composta possua um pico próximo do pico do primeiro harmônico da decomposição, espera-se que o procedimento de cálculo que realiza a análise de Fourier (método harmônico) apresente perdas por histerese maiores do que o procedimento de cálculo que utiliza o método não-harmônico, o qual aplica o modelo de Steinmetz apenas com o valor de pico da forma de onda composta no tempo. Portanto, foi proposta uma forma de onda didática para a tensão a ser aplicada nos enrolamentos do *core tester*, de modo a gerar um fluxo magnético  $\phi$  (correlacionado com a indução magnética) que apresentasse essa característica: valor de pico da onda composta próximo do valor de pico do harmônico fundamental. A Figura 37 ilustra uma das tensões idealizadas para essa simulação, onde a mesma forma de onda defasada de  $90^\circ$  elétricos deve ser aplicada ao segundo enrolamento primário, de modo a garantir a operação adequada do dispositivo.

Figura 37 – Alimentação composta de harmônicos proposta.

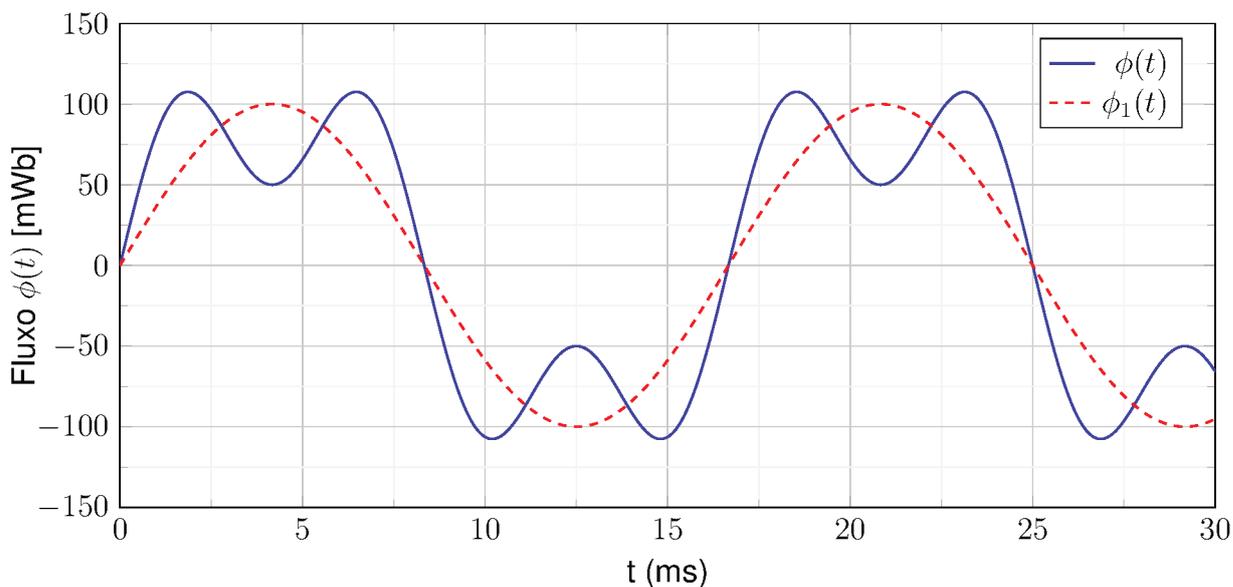


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Da aplicação da tensão da Figura 37, espera-se que o fluxo magnético que circulará no estator tenha a forma de onda ilustrada na Figura 38, de acordo com a Lei de Lenz. Na figura, está ilustrado tanto a forma de onda resultante,  $\phi(t)$ , como a forma de onda do harmônico fundamental,  $\phi_1(t)$ , atendendo a característica desejada para essa simulação. Espera-se que, ao alimentar o dispositivo com a tensão indicada na Figura 37 e obtendo uma indução com forma de onda semelhante ao da Figura 38, as perdas por histerese obtidas pelo método de cálculo não-harmônico sejam menores do que as obtidas pelo método harmônico, tanto no comparativo do caso *stressless* como após a correção realizada pelo acoplamento magnetomecânico.

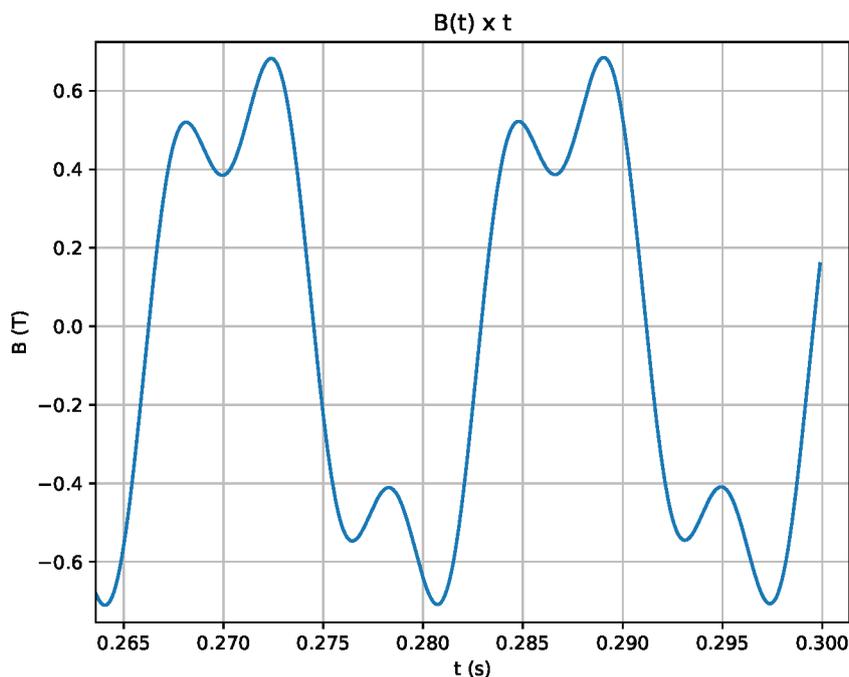
Após rodar as simulações, alternando o método de cálculo de perdas entre o não-harmônico e harmônico, o mesmo conjunto de resultados obtidos para o caso linear senoidal foi analisado, de modo a verificar as premissas indicadas anteriormente. A Figura 39 apresenta a indução tangencial  $B_t(t)$  em um elemento do estator ao longo do tempo. Percebe-se que, embora a forma de onda não seja estritamente igual ao da Figura 38, a curva obtida é semelhante. De modo a garantir os resultados qualitativos esperados, realizou-se uma análise harmônica da indução apresentada utilizando o módulo DSN, de pós processamento, na qual foi constatado que o harmônico fundamental apresenta um valor de pico relativamente próximo ao pico da onda da Figura 39 (94.473% do valor), o que não deve modificar expressivamente os resultados esperados.

Figura 38 – Fluxo magnético composto de harmônicos idealizado.



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 39 – Indução tangencial  $B_t(t)$  em um elemento do estator do *core tester*

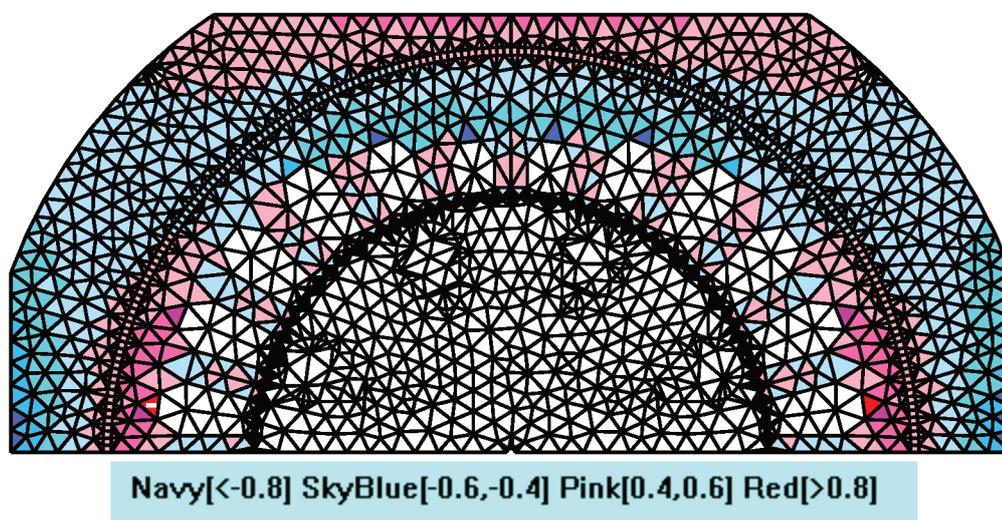


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

As Figura 40 e Figura 41 ilustram as distribuições de estresses equivalentes obtidas pelos métodos de cálculo não-harmônico e harmônico, respectivamente. Os valores base de normalização da escala de cores foram semelhantes, sendo  $\sigma_{eq,max} = 96.156$  MPa para o cálculo não-harmônico e  $\sigma_{eq,max} = 96.155$  MPa para o cálculo harmônico. Percebe-se que eles possuem distribuições muito parecidas, exceto por alguns poucos elementos. Além disso, ambas as figuras são semelhantes às distribui-

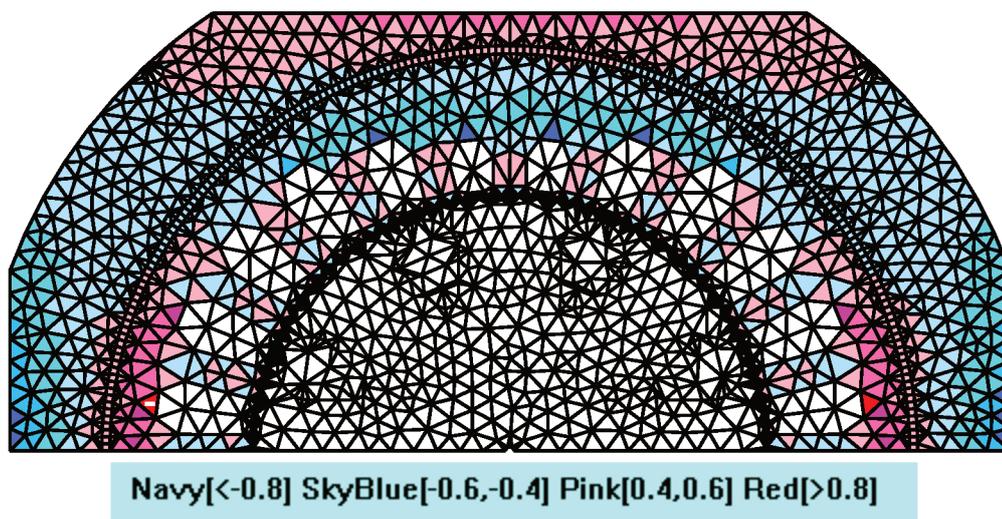
ções obtidas pela simulação com alimentação senoidal. Isso é possível, pois o cálculo do estresse equivalente leva em conta a orientação local da indução magnética no elemento, mas não a sua intensidade, de acordo com a Equação (15). Dessa forma, desde que as orientações das induções sejam semelhantes nos elementos, alimentações diferentes do dispositivo geram distribuições de  $\sigma_{eq,i}$  semelhantes. No entanto, comparando a Figura 32 com a Figura 39, espera-se que as perdas computadas para a alimentação harmônica sejam menores, devido à diferença entre os níveis de induções.

Figura 40 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 41 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 4 exibe os resultados numéricos das perdas por histerese obtidos pelas simulações, considerando os métodos de cálculo não-harmônico e harmônico. Os valores confirmam a premissa de que as perdas nessa simulação deveriam ser menores do que no caso com alimentação senoidal. Adicionalmente, devido à presença de harmônicos no sinal, o aumento expressivo de perdas obtido ao se variar o método de cálculo (não-harmônico versus harmônico) também está coerente. O acoplamento magnetomecânico, ao ser realizado para corrigir as perdas por histerese em cada frequência que compõe o sinal, promove um efeito composto no aumento geral das perdas, o que não ocorre para o caso senoidal, conforme visto anteriormente.

Tabela 4 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso linear com alimentação composta de harmônicos.

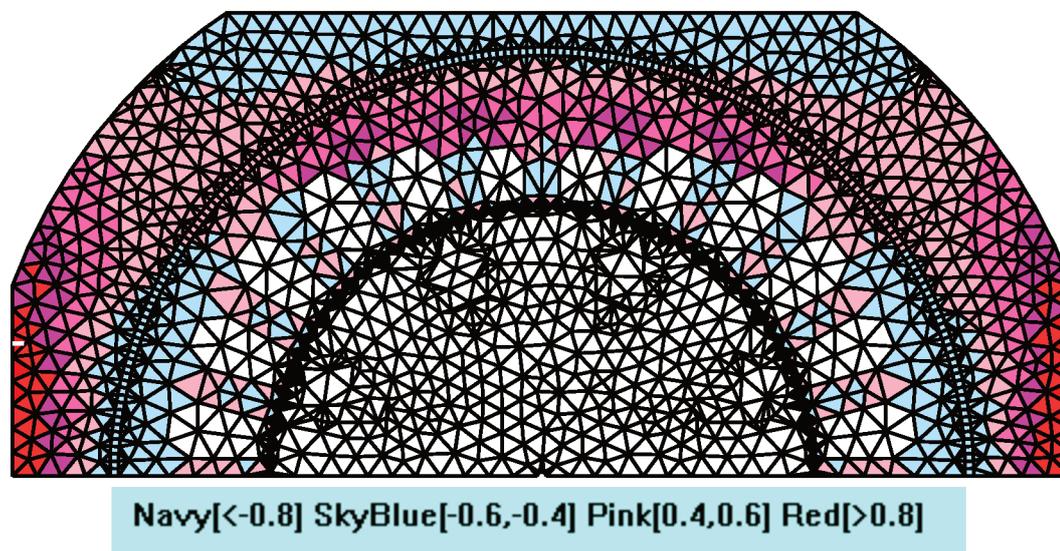
Meio	Não-harmônico			Harmônico		
	$W_h^o$ [W/m]	$W_h^i$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]	$W_h^o$ [W/m]	$W_h^i$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]
Estator	13.70	17.39	26.93	16.75	23.95	42.99
Rotor	5.67	5.67	0.00	6.78	6.78	0.00

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Dos resultados numéricos da Tabela 4, espera-se que ocorram modificações nas distribuições das diferenças de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$ . A Figura 42 e Figura 43 mostram as distribuições das diferenças locais de perdas por histerese para ambas as metodologias de cálculo. Constata-se que as distribuições possuem semelhança com as distribuições encontradas para a simulação senoidal (Figura 35 e Figura 36), porém com alguns elementos contendo valores maiores de aumento de perdas locais, especialmente nas proximidades de onde se aplicou a carga mecânica. No mais, quando comparadas entre si, percebe-se que o método de cálculo harmônico possui elementos com ainda maiores diferenças positivas de perdas (aumento de perdas locais), o que está de acordo com o resultado numérico obtido na Tabela 4 acima, no qual as perdas aumentam mais expressivamente ao se utilizar o método harmônico para o cálculo.

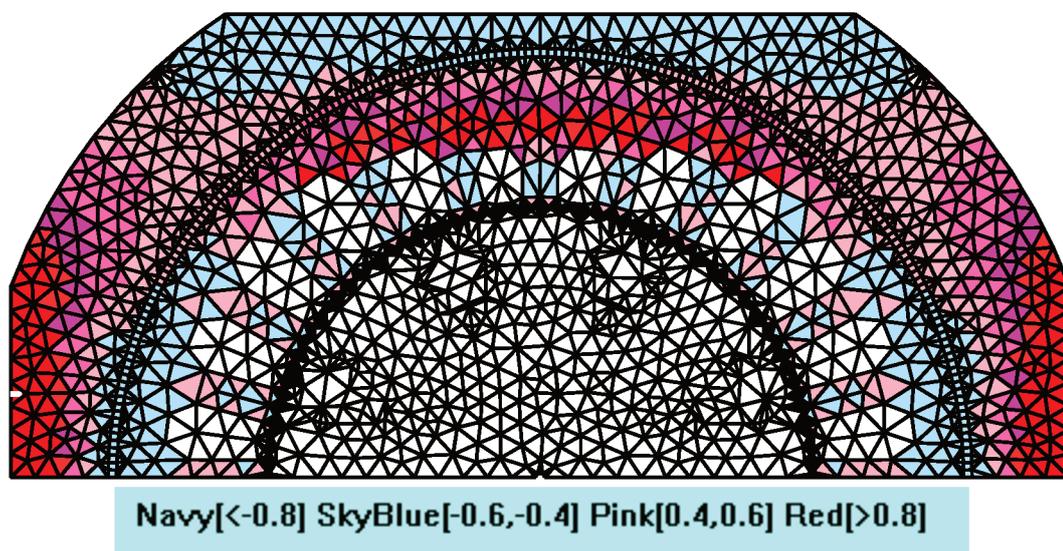
As distribuições das diferenças de perdas mantiveram o caráter de dualidade em relação às distribuições de estresses equivalentes, sendo esse comportamento também observado na simulação anterior. Novamente, embora as escalas de cor contenham as mesmas divisões para todos os *plots*, para as diferenças de perdas o valor base é cem e, portanto, os valores locais são obtidos em porcentagem (%), em coerência com a forma como as diferenças  $\Delta W_h$  são apresentadas na Tabela 4.

Figura 42 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 43 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

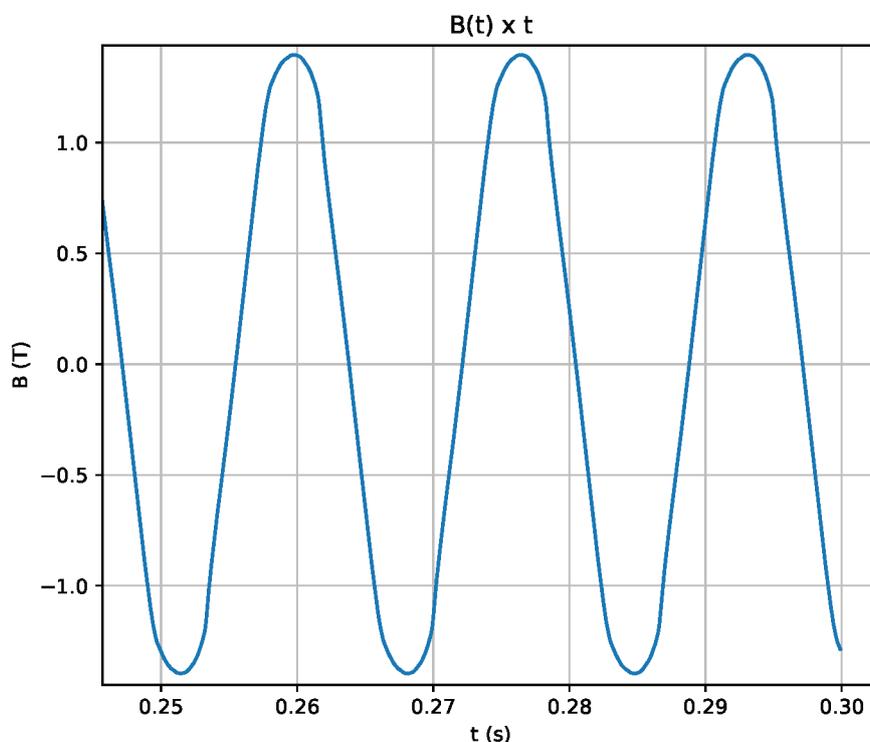
Validados os resultados da implementação realizada para simulações lineares, com alimentações senoidais puras ou com componentes harmônicos e utilizando ambos os métodos de cálculo, remanesce apenas a validação dos resultados e da assertividade do acoplamento magnetomecânico proposto quando a saturação do material é levada em conta, fenômeno que normalmente ocorre nas simulações não-lineares que podem ser feitas no EFCAD, fazendo uso do módulo EFCM.

## 4.2 SIMULAÇÕES NÃO-LINEARES

De modo a não acumular diferentes graus de complexidade para a interpretação dos resultados, apenas a simulação com alimentação senoidal pura foi executada novamente, habilitando a saturação da indução magnética nos materiais do dispositivo. Portanto, as excitações realizadas são as mesmas da simulação linear senoidal, sendo que apenas os resultados apresentarão diferenças devido à não-linearidade.

A Figura 44 ilustra a indução tangencial obtida em um elemento da malha do estator. Embora ela pareça uma senóide pura, uma decomposição do espectro da mesma indica que componentes harmônicos compõe a onda, ainda que a magnitude desses harmônicos seja expressivamente menor do que a magnitude da frequência fundamental. Para essa condição de simulação, a indução radial apresentou componentes harmônicos mais relevantes, porém a forma de onda resultante para  $B_r(t)$  possui amplitudes inferiores do que a da indução tangencial, o que mantém a preponderância da indução tangencial frente aos resultados esperados. Dessa forma, estima-se que o método de cálculo não-harmônico apresente perdas menores do que o método de cálculo harmônico, semelhante à última simulação, porém o efeito não deve ser tão expressivo como anteriormente.

Figura 44 – Indução tangencial  $B_t(t)$  em um elemento do estator do *core tester*

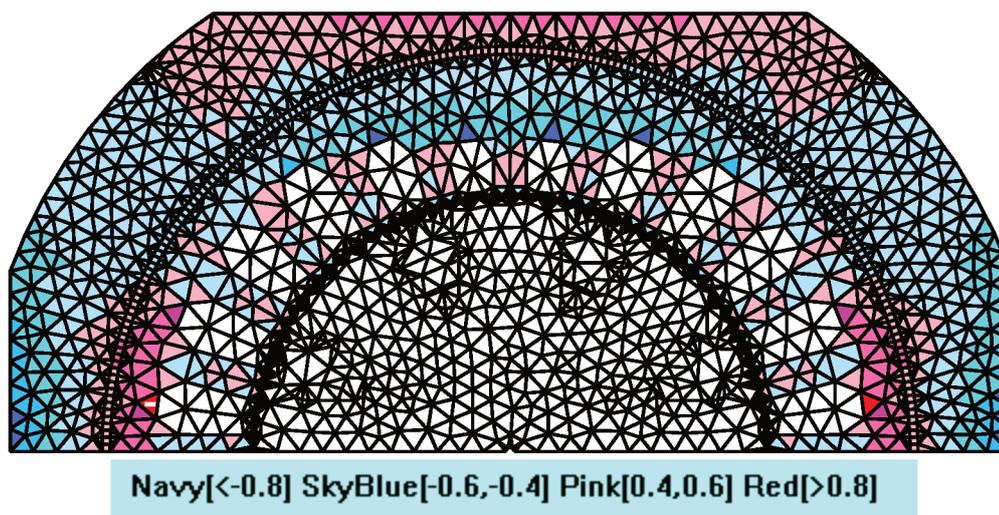


Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

As Figura 45 e Figura 46 apresentam as distribuições de estresses equivalen-

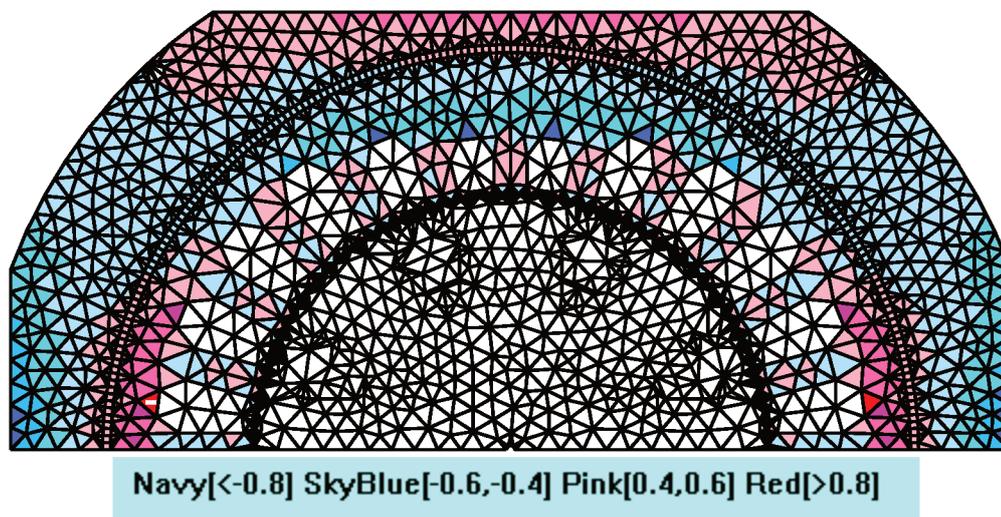
tes após as simulações serem realizadas, modificando-se o método de cálculo entre o não-harmônico e o harmônico. Para a normalização dos estresses, o valor base para o cálculo não-harmônico foi  $\sigma_{eq,max} = 96.170$  MPa, enquanto que para o cálculo harmônico o valor base foi  $\sigma_{eq,max} = 96.164$  MPa. Comparando os resultados com as distribuições obtidas na simulação senoidal linear, percebe-se que elas são bastante semelhantes entre si, contendo alguns elementos com valores distintos. Novamente, o mapeamento de  $\sigma_{eq}$  ao longo da malha depende apenas dos resultados da simulação mecânica, que, para uma mesma condição de carga, podem ser considerados “estáticos” e da orientação da indução magnética local em cada elemento. Dessa forma, nessas simulações realizadas, basta que as orientações sejam semelhantes entre si para que os estresses equivalentes computados sejam numericamente próximos, o que normalmente os leva para a mesma escala de cor nos *plots*.

Figura 45 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 46 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

A Tabela 5 indica os resultados numéricos da simulação não-linear, onde pode-se confirmar a premissa de que as perdas seriam menores para o caso não-harmônico, pois não levaria em conta a decomposição harmônica que ocorre nas induções de cada elemento. Do ponto de vista do método não-harmônico, comparando-se entre a Tabela 3 e a Tabela 5, o efeito da saturação nas perdas obtidas é indicado na redução dos valores da Tabela 5, visto que os níveis de indução possuem limites nessa simulação, conforme a Figura 44 ilustra. Embora a análise de Fourier aumente as perdas quando a simulação usa o método harmônico, a diferença global de perdas  $\Delta W_h$  não é tão expressiva quanto na segunda simulação apresentada nesse trabalho. Conforme comentado, os harmônicos obtidos para a indução da Figura 44 possuem amplitudes expressivamente menores do que a amplitude da frequência fundamental. No entanto, na segunda simulação apresentada, o 3º harmônico adicionado propositalmente continha cerca de 36.32% do valor da amplitude do 1º harmônico, o que justificou a diferença de perdas bem mais expressiva apresentada na Tabela 4.

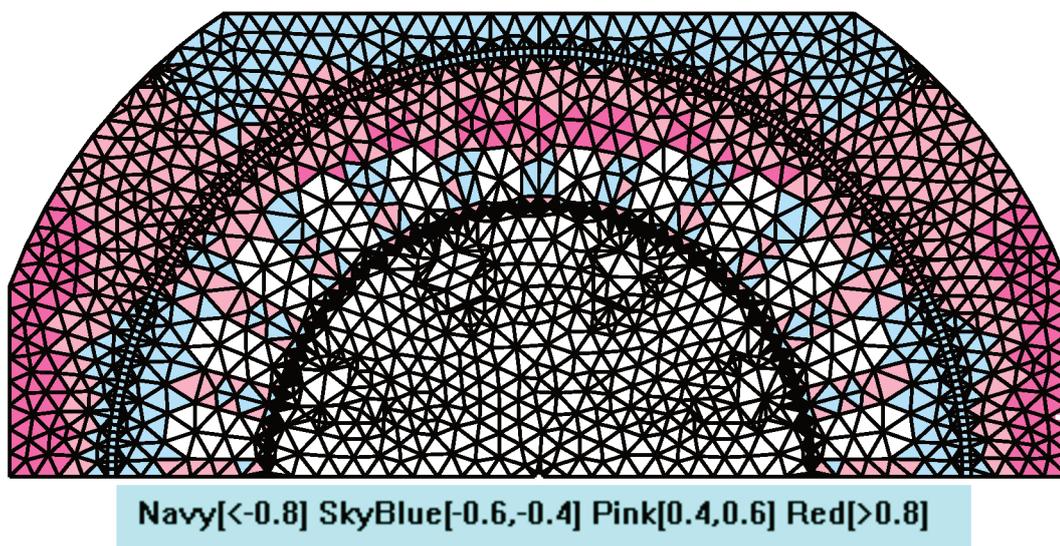
Tabela 5 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso não-linear com alimentação senoidal.

Meio	Não-harmônico			Harmônico		
	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]
Estator	48.56	56.66	16.68	50.93	59.66	17.13
Rotor	18.16	18.16	0.00	22.17	22.17	0.00

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

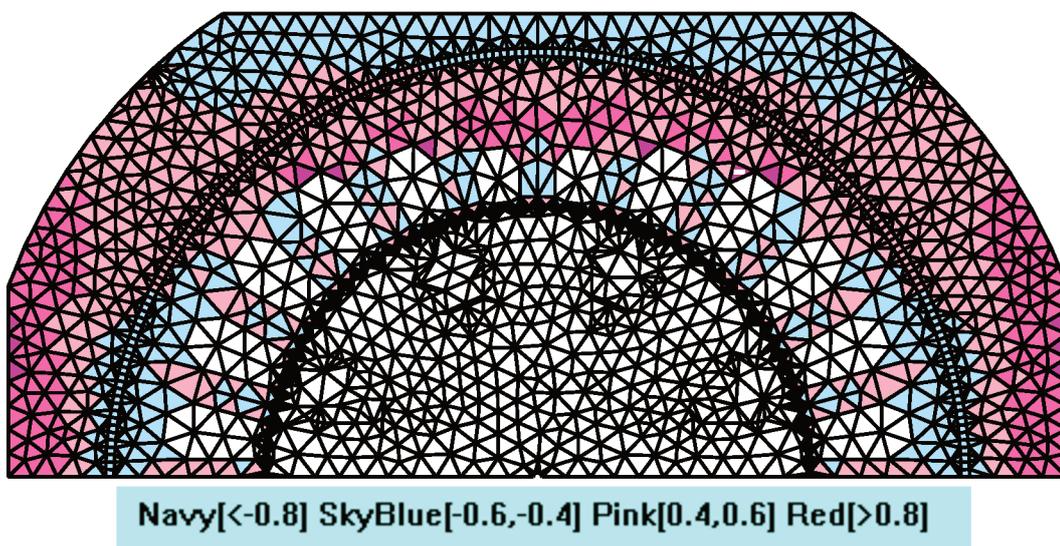
O aumento global das perdas devido ao acoplamento magnetomecânico indicado na Tabela 5 pode ser discretizado para cada elemento da malha através das distribuições da diferença de perdas, apresentadas na Figura 47 e na Figura 48. Conforme as distribuições de estresses equivalentes apresentadas, um conjunto de elementos apresenta redução nas perdas por histerese devido ao acoplamento, enquanto que o outro conjunto de elementos apresenta aumento nas perdas, porém com maior intensidade e quantidade.

Figura 47 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo não-harmônico (NH).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 48 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Conforme também esperado para essa última simulação realizada, as distribuições de  $\Delta W_{h,i}$  obtidas apresentam a mesma “dualidade” observada nos casos anteriores, bem como a representação dos valores estarem em porcentagem (base cem). Como a alimentação dessa simulação também é uma senóide pura, a mesma da primeira simulação, observa-se que as distribuições obtidas em ambas as simulações são semelhantes na maior parte dos elementos, apresentando inclusive escala de cores iguais, o que não se observa em um comparativo com a segunda simulação, onde o aumento de perdas foi mais expressivo e portanto as escalas de cores das distribuições divergem mais frequentemente.

A obtenção de todo o conjunto de resultados apresentado nesse capítulo permite concluir a implementação computacional realizada internamente ao EFCAD, onde os resultados qualitativos esperados foram validados em três simulações distintas, contendo características particulares. A alteração da condição de carga sobre o *core tester* na simulação mecânica do capítulo anterior permite que um novo conjunto de resultados seja obtido, possibilitando interpretações mais aprofundadas acerca do impacto das condições mecânicas nas quais dispositivo está submetido. No Apêndice A constam tais conjuntos de resultados para as condições  $F_y$  e  $F_x+F_y$ , os quais estendem a gama de soluções que podem ser obtidas com a aplicação das ferramentas desenvolvidas nesse trabalho.

## 5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, uma revisão teórica foi realizada, sobretudo acerca dos procedimentos de cálculo e separação de perdas magnéticas em materiais ferromagnéticos e o fenômeno de magnetostricção e acoplamento magnetomecânico. De modo a fazer uso dos resultados experimentais obtidos em trabalhos anteriores, um conjunto de funções foi proposto e suas constantes foram obtidas através de um processo de ajuste de curvas, realizado computacionalmente através da linguagem Python. As constantes obtidas forneceram coeficientes de determinação  $r^2$  muito próximos da unidade, o que permitiu o emprego do conjunto proposto nas etapas seguintes do trabalho.

Após a escolha de um dispositivo para estudo, levando em consideração uma elaboração de aparato experimental para aplicação em conjunto com o mesmo, um modelo de simulação mecânica foi configurado para a solução do problema de elasticidade sujeito a condições de cargas mecânicas distintas, utilizando o conjunto de ferramentas GetDP e Gmsh. Os resultados permitiram algumas análises qualitativas da distribuição de esforços ao longo do dispositivo, visto que uma distribuição da indução magnética é exigida para se computar o estresse equivalente, parâmetro de maior interesse neste trabalho.

Finalmente, uma simulação magnética foi performada utilizando o mesmo dispositivo e malha de elementos finitos da simulação mecânica. Nessa simulação, o cálculo de perdas por histerese original do EFCAD foi modificado para a metodologia proposta, que altera as perdas de acordo com o valor de estresse equivalente local em cada elemento da malha. Três condições de alimentação do dispositivo foram simuladas e, de uma maneira global, um aumento nas perdas por histerese na região do estator foi constatada, sendo de no mínimo 16.06% até 42.99%. Localmente, no entanto, aumentos e reduções de perdas puderam ser obtidos, conforme as cartas de distribuição da variação de perdas indicaram. Para a condição mecânica aplicada, de compressão, os resultados globais obtidos são coerentes com a revisão bibliográfica apresentada.

A execução desse trabalho permitiu que diversas ferramentas pudessem ser desenvolvidas, tanto na parte de criação de subsídios para simulações de campos utilizando o EFCAD, como na parte das simulações magnéticas em si. Um maior entendimento dos códigos fontes do EFCAD e de seus módulos permite que outras implementações sejam possíveis, não se restringindo apenas ao acoplamento magnetomecânico. Devido à ausência de aparato experimental que permita a aplicação de esforços sobre o *core tester* de estudo, os resultados obtidos via simulação foram validados apenas em caráter qualitativo, remanescendo uma validação experimental para fornecer maior credibilidade aos resultados numéricos.

O encerramento desse trabalho constitui uma transição importante na linha de pesquisa estabelecida no GRUCAD, onde os dados e as propriedades dos materiais ferromagnéticos obtidos em ensaios agora permitem modificações de resultados de simulações magnéticas, anteriormente realizadas sem considerar efeitos de acoplamento magnetomecânico. Espera-se que os resultados obtidos nessa dissertação incentivem e facilitem a continuação e aprimoramento dessa área de estudo em novos trabalhos e pesquisas do GRUCAD.

## 5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo da preparação e execução da implementação computacional, diversos tópicos de interesse surgiram e foram objetos de discussão, ainda que não tenham sido elaborados e desenvolvidos. De forma a proporcionar um direcionamento para a continuação da linha de pesquisa de estudos mecânicos e do acoplamento magnetomecânico, tais tópicos são listados abaixo como sugestões e propostas para futuros trabalhos:

- i) Desenvolvimento de aparato experimental para aplicação e medição de esforços mecânicos no *core tester*, de modo a validar os resultados computacionais obtidos nesse trabalho e, eventualmente, em outros estudos.
- ii) Ampliação da implementação computacional desenvolvida, visando contemplar os cálculos de perdas por histerese que levam em consideração os campos rotativos e o nível DC de indução magnética no dispositivo.
- iii) Estudos de outras formulações de funções, possivelmente mais simples, para o conjunto  $[g_k(\sigma)]$ , obtido no procedimento de ajuste de curvas realizado sobre os dados experimentais de Da Silva (2019).
- iv) Incluir a correção das perdas por histerese devido ao acoplamento magnetomecânico em outros módulos do EFCAD, de acordo com o interesse e a necessidade dos membros do GRUCAD na continuação da linha de pesquisa.
- v) Complementar a implementação computacional realizada, de modo a contemplar a variação da permeabilidade magnética  $\mu$  nos procedimentos de cálculo pelo MEF, haja visto que os esforços mecânicos também influenciam o comportamento dessa propriedade dos materiais ferromagnéticos.

## REFERÊNCIAS

- AYDIN, U. *et al.* Magneto-mechanical modeling of electrical steel sheets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Elsevier BV, v. 439, p. 82–90, out. 2017. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.05.008.
- BAGHEL, A. P. S. *et al.* Effect of mechanical stress on different core loss components along orthogonal directions in electrical steels. **Electrical Engineering**, Springer Science e Business Media LLC, v. 101, n. 3, p. 845–853, ago. 2019. DOI: 10.1007/s00202-019-00827-4.
- 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**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- BERNARD, Laurent; DANIEL, Laurent. Effect of Stress on Magnetic Hysteresis Losses in a Switched Reluctance Motor: Application to Stator and Rotor Shrink Fitting. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 9, p. 1–13, set. 2015. DOI: 10.1109/tmag.2015.2435701.
- BERNARD, Laurent; MININGER, Xavier *et al.* Effect of Stress on Switched Reluctance Motors: A Magneto-Elastic Finite-Element Approach Based on Multiscale Constitutive Laws. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 47, n. 9, p. 2171–2178, set. 2011. DOI: 10.1109/tmag.2011.2145387.
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 1, p. 621–630, jan. 1988. DOI: 10.1109/20.43994.
- BERTOTTI, G. **Hysteresis in magnetism : for physicists, materials scientists, and engineers**. San Diego: Academic Press, 1998. ISBN 9780120932702.
- 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, mar. 1985. DOI: 10.1063/1.334404.
- BERTOTTI, G. Space-time correlation properties of the magnetization process and eddy current losses: Applications. I. Fine wall spacing. **Journal of Applied Physics**, AIP Publishing, v. 55, n. 12, p. 4339–4347, jun. 1984. DOI: 10.1063/1.333001.
- BOHN, F. **Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado**. [S.l.: s.n.], 2005.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1993. ISBN 9780780310322.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to magnetic materials**. Hoboken, N.J.: IEEE/Wiley, 2009. ISBN 9780470386323.

DA SILVA, I. P. C. **Estudos sobre o efeito dos esforços mecânicos no comportamento de valores de parâmetros de modelos de perdas magnéticas**. 2019. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

DANIEL, Laurent; HUBERT, Olivier. Equivalent Stress Criteria for the Effect of Stress on Magnetic Behavior. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 46, n. 8, p. 3089–3092, ago. 2010. DOI: 10.1109/tmag.2010.2044561.

DULAR, P. *et al.* A general environment for the treatment of discrete problems and its application to the finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, n. 5, p. 3395–3398, set. 1998.

EKREEM, N.B. *et al.* An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier BV, v. 191, n. 1-3, p. 96–101, ago. 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.064.

ELIAS, R. A. **Estudo de dois métodos de medição de campo magnético em aços elétricos**. [S.l.: s.n.], 2014.

FIORILLO, F.; APPINO, C.; PASQUALE, M. Hysteresis in Magnetic Materials. *In: THE Science of Hysteresis*. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 3. P. 1–190. DOI: 10.1016/b978-012480874-4/50019-1.

GEUZAIN, Christophe; REMACLE, Jean-François. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Wiley, v. 79, n. 11, p. 1309–1331, mai. 2009. DOI: 10.1002/nme.2579.

GRAHAM, C. D. Physical origin of losses in conducting ferromagnetic materials (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 53, n. 11, p. 8276–8280, nov. 1982. DOI: 10.1063/1.330306.

IAMAMURA, B. A. T. **Desenvolvimento de um dispositivo magnético para teste de estatores**. 2008. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

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**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 42, n. 3, p. 658–667, mai. 2006. DOI: 10.1109/tia.2006.872941.

JILES, D C. Theory of the magnetomechanical effect. **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP Publishing, v. 28, n. 8, p. 1537–1546, ago. 1995. DOI: 10.1088/0022-3727/28/8/001.

KARTHAUS, Jan *et al.* Effect of mechanical stress on different iron loss components up to high frequencies and magnetic flux densities. **COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, Emerald Group Publishing Ltd., v. 36, p. 580–592, 3 2017.

MAILHÉ, B. J. **Characterization and modelling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical stress**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

MAZZETTI, P. Bloch walls correlation and magnetic loss in ferromagnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 5, p. 758–763, set. 1978. DOI: 10.1109/tmag.1978.1059901.

MIYAGI, Daisuke *et al.* Estimation of iron loss in motor core with shrink fitting using FEM analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 45, p. 1704–1707, 3 mar. 2009.

SAEED, O. **Effect of static stress and magnetic ageing on iron losses for non oriented and grainoriented electrical steels**. 2015. Diss. (Mestrado) – McGill University.

SCHLEGEL, J. P. **Desenvolvimento de um sistema de avaliação de estatores sob campos rotacionais**. 2011. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SCHLEGEL, J. P. *et al.* Core Tester Iron Losses Segregation by Finite Element Modeling. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 48, n. 2, p. 715–718, fev. 2012. DOI: 10.1109/tmag.2011.2172777.

STEINMETZ, C. P. Reedição do original "On the law of hysteresis". **Proceedings of the IEEE**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 72, n. 2, p. 197–221, 1984. DOI: 10.1109/proc.1984.12842.

THE SCIPY COMMUNITY. **Scipy.optimize.curve\_fit**. 25 jan. 2021. Disponível em: [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve\\_fit.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html).

YAMAZAKI, Katsumi; TAKEUCHI, Hidetada. Impact of Mechanical Stress on Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., v. 53, p. 963–970, 2 mar. 2017.

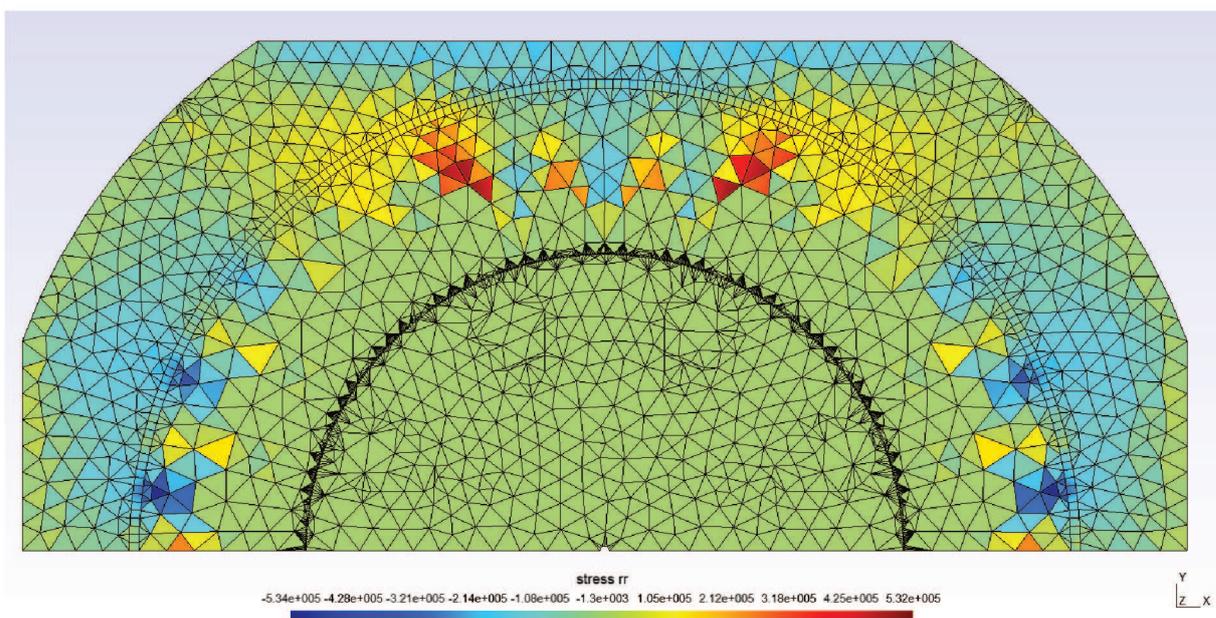
## APÊNDICE A – RESULTADOS EXTRAS DE SIMULAÇÃO: CASOS Fy E Fx+Fy

O texto original dessa dissertação apresenta uma variedade de resultados para apenas uma condição mecânica (Caso Fx). De modo a demonstrar as possibilidades de simulações mecânicas, bem como o impacto nas simulações magnéticas, devido ao acoplamento magnetomecânico implementado no EFCAD, esse Apêndice apresenta resultados adicionais, variando-se as condições iniciais de esforços mecânicos. Similiar ao Caso Fx, o Caso Fy também é uma condição de compressão do dispositivo, porém no sentido vertical, sendo a força aplicada na região superior do *core tester*. O Caso Fx+Fy ocorre ao se aplicar, simultaneamente, ambas as compressões horizontal (Caso Fx) e vertical (Caso Fy), de modo a verificar se e como ocorre a superposição dessas condições nos resultados finais.

### A.1 SIMULAÇÕES MECÂNICAS

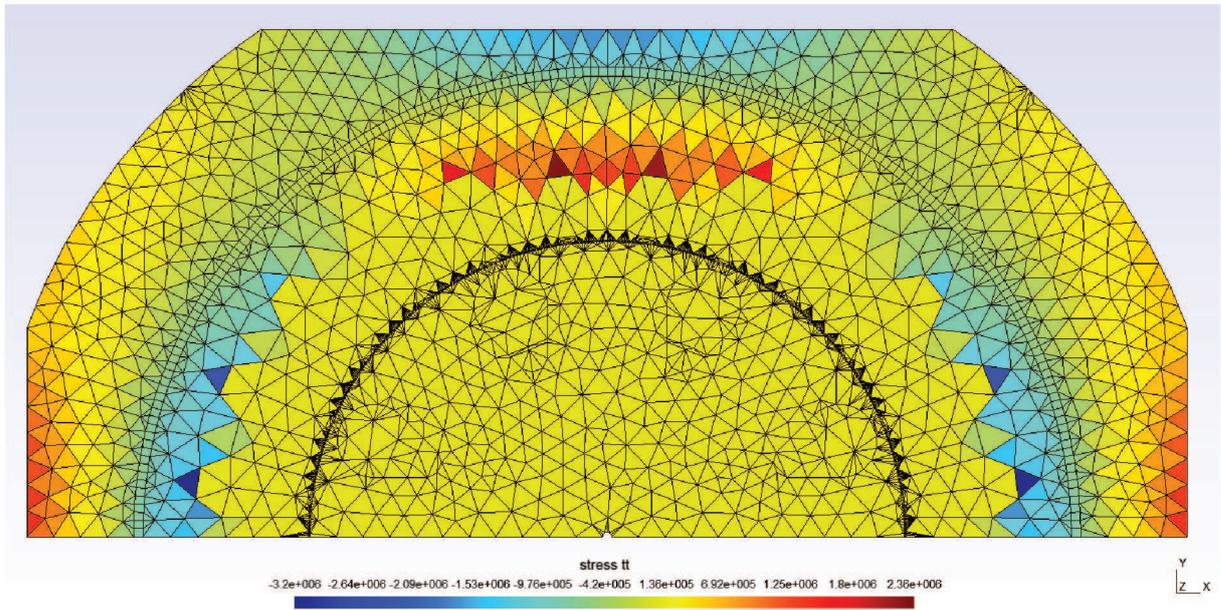
Dos resultados de simulação mecânica, há um interesse maior nas distribuições de  $\sigma_{rr}$  e  $\sigma_{\theta\theta}$ , embora o  $\sigma_{r\theta}$  também faça parte do cálculo de  $\sigma_{eq}$  indicado na Equação (15). A Figura 49 e Figura 50 indicam as distribuições de  $\sigma_{rr}$  e  $\sigma_{\theta\theta}$  para o Caso Fy, respectivamente, enquanto que a Figura 51 e Figura 52 apresentam os mapeamentos de  $\sigma_{rr}$  e  $\sigma_{\theta\theta}$  para o Caso Fx+Fy, respectivamente. As conclusões acerca das figuras seguem a mesma linha de raciocínio apresentada no Capítulo 3, onde a ausência das distribuições das induções magnéticas no dispositivo não permite maiores interpretações do ponto de vista do que deverá ocorrer com o  $\sigma_{eq}$  no *core tester*.

Figura 49 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{rr}$  (Caso Fy).



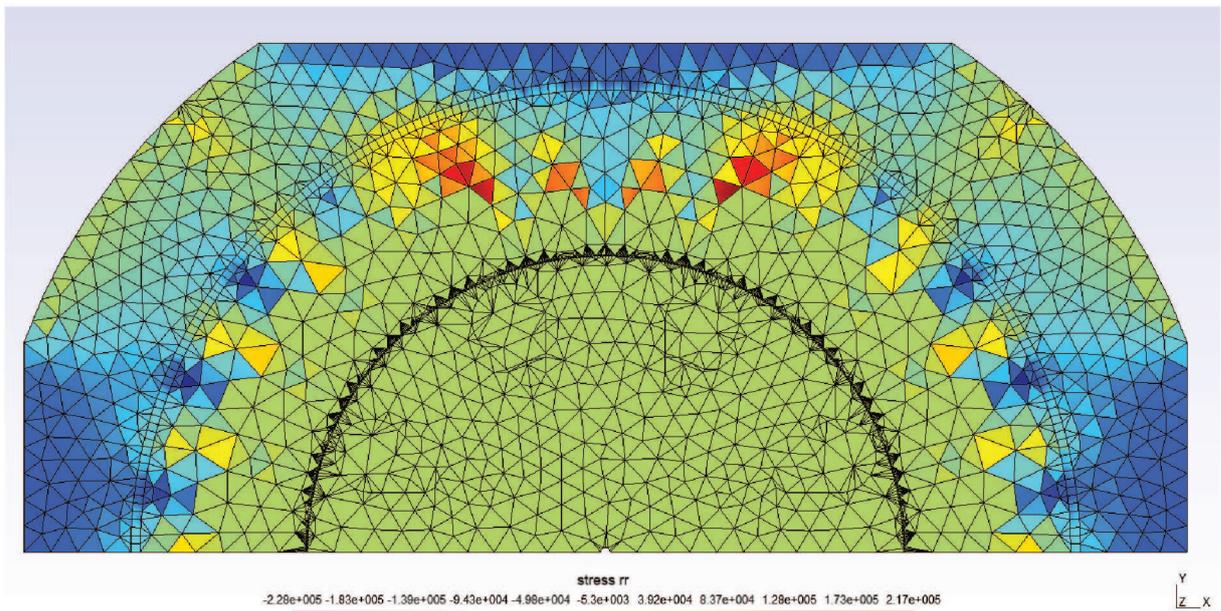
Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 50 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{\theta\theta}$  (Caso Fy).



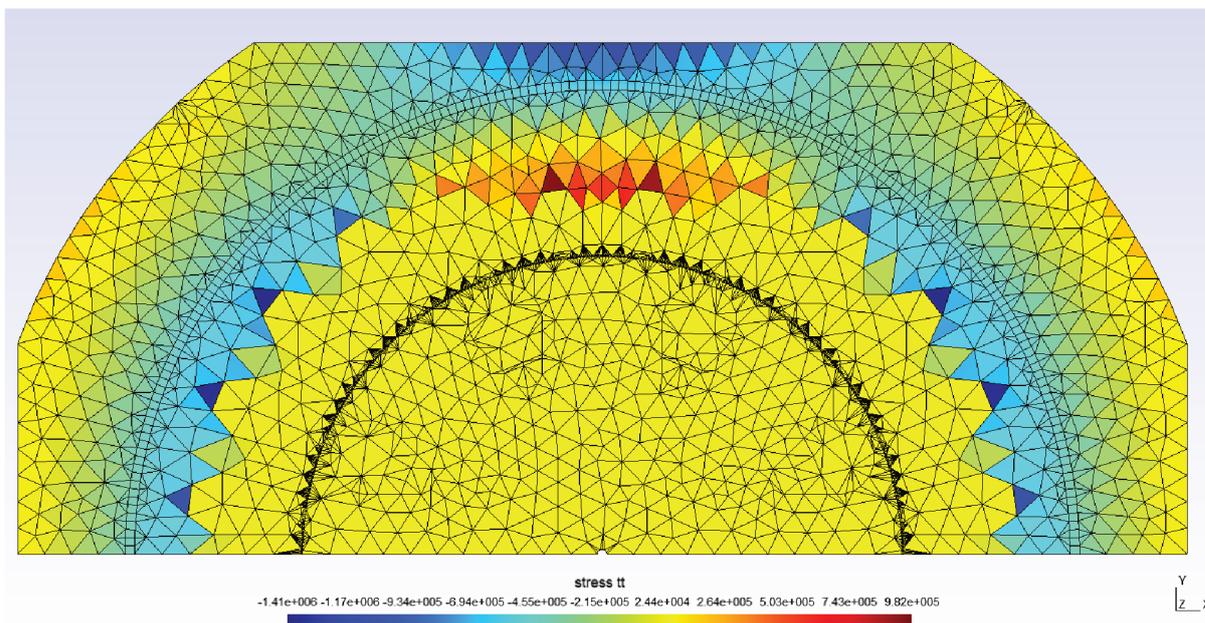
Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 51 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{rr}$  (Caso Fx+Fy).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 52 – Resultado de simulação mecânica - distribuição de esforços  $\sigma_{\theta\theta}$  (Caso Fx+Fy).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Os resultados acima são requisitos para as simulações magnéticas que serão apresentadas em sequência, pois arquivos de texto são gerados, contendo, elemento a elemento, os estresses apresentados graficamente nas figuras apresentadas. Esses arquivos são lidos pela rotina implementada no EFCAD, conforme apresentado anteriormente.

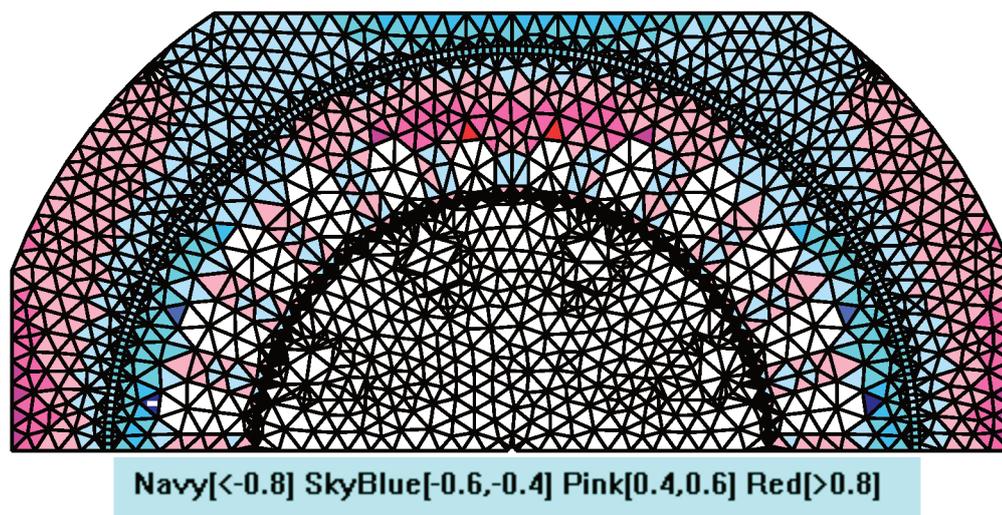
## A.2 SIMULAÇÕES MAGNÉTICAS

Das três alimentações simuladas no Capítulo 4, apenas a simulação linear com alimentação senoidal será tratada nesse Apêndice. Por ser um caso ideal de excitação e operação, a interpretação dos resultados se torna mais simples. Além disso, empregou-se apenas o método de cálculo harmônico (H), devido ao fato desse método e suas rotinas internas terem sido validas mais vezes ao longo dos anos no GRUCAD, o que implica que uma quantidade maior de erros e *bugs* foram corrigidos para essa metodologia.

A Figura 53 apresenta a distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  para a simulação contendo o arquivo de esforços do Caso Fy. A normalização dos estresses ocorre através do valor de base  $\sigma_{eq,max} = 152.10$  MPa. Um nítida diferença entre a distribuição do Caso Fx existe, devido ao local onde o esforço é aplicado nesse caso. Entretanto, a composição global dos esforços locais indica que uma condição de compressão predomina no dispositivo, o que deve implicar um aumento nas perdas quando o acoplamento magnetomecânico for levado em conta nos cálculos. A Tabela 6

confirma essa expectativa, ao indicar os valores de perdas por histerese nos meios do *core tester* para a simulação na condição *stressless* ( $W_h^o$ ) e na condição que considera o acoplamento magnetomecânico ( $W_h'$ ), bem como a diferença percentual entre ambas ( $\Delta W_h$ ), normalizadas pelo valor no caso livre de esforços.

Figura 53 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

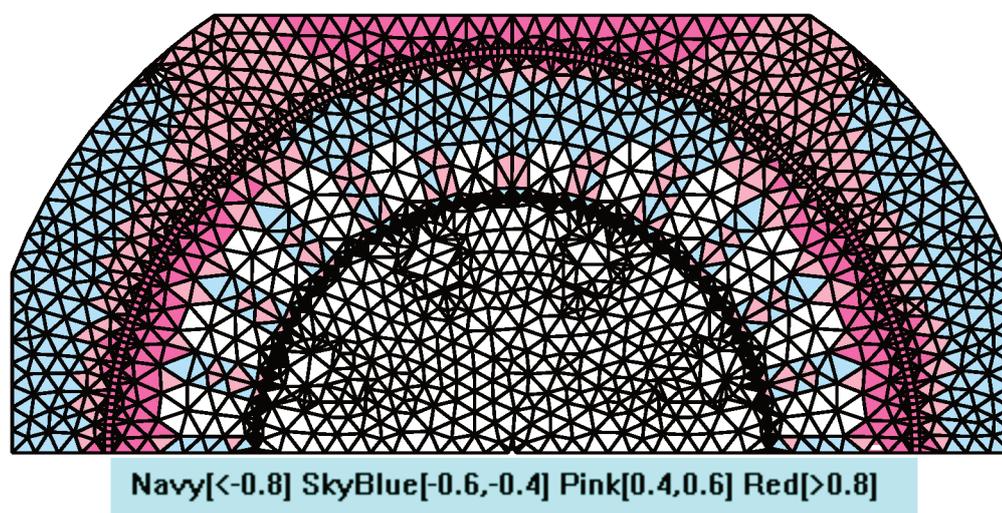
Tabela 6 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso Fy.

Meio	Harmônico		
	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]
Estator	48.28	56.31	16.64
Rotor	19.19	19.19	0.00

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Novamente, uma interpretação gráfica da Tabela 6 pode ser obtida com uma distribuição local da diferença de perdas por histerese ao longo dos elementos do estator. A Figura 54 apresenta essa distribuição, normalizada pelo valor de base cem, para o Caso Fy, onde nota-se outra vez o aspecto dual em relação à distribuição de estresses equivalentes. Visualmente, percebe-se a predominância de diferenças positivas de perdas (aumento de perdas), o que está em coerência com os dados numéricos obtidos anteriormente.

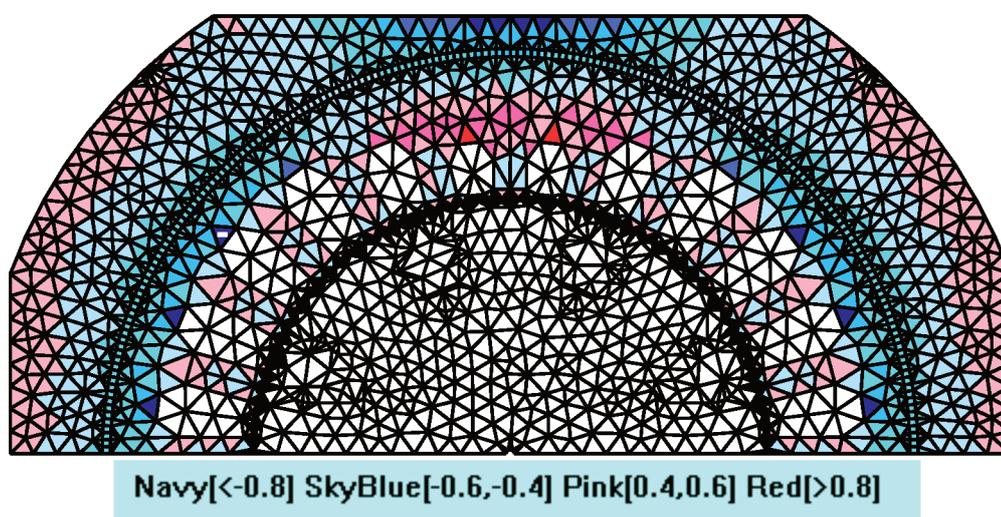
Figura 54 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Para a simulação levando em conta o Caso F+Fy de carga mecânica, é possível notar a composição dos resultados individuais obtidos anteriormente. A Figura 55 apresenta a distribuição dos estresses equivalentes para essa simulação, com valor base de normalização sendo  $\sigma_{eq,max} = 67.33$  MPa, o que indica uma tendência do estresse equivalente local de um caso atenuar o obtido na outra condição de carga. No entanto, a predominância global de esforços de compressão dá indícios de que um aumento de perdas será mais expressivo nessa condição do que nos casos individuais.

Figura 55 – Distribuição dos estresses equivalentes  $\sigma_{eq,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

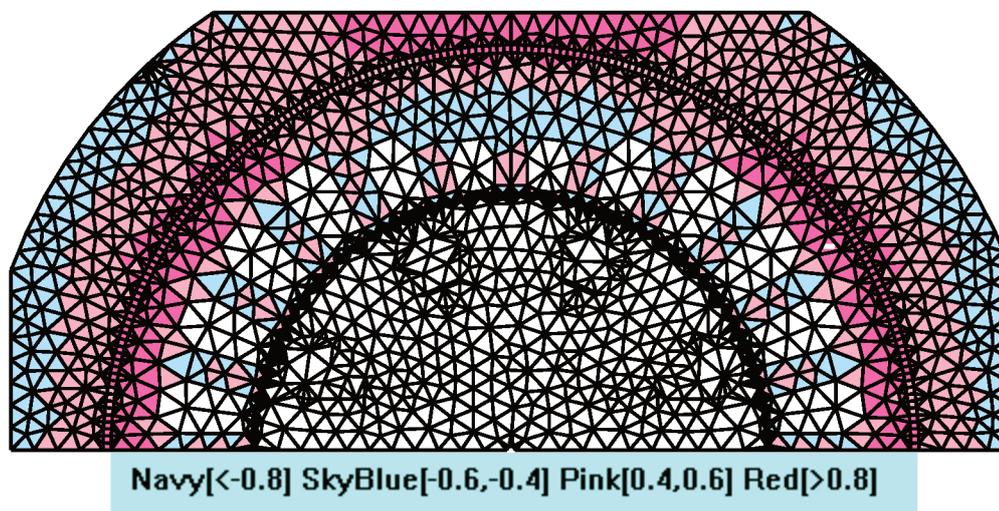
A Tabela 7 apresenta os resultados numéricos comparativos das perdas por histerese, que confirmam o esperado da análise da Figura 55. A aplicação simultânea das forças no eixo horizontal e vertical, ambas de mesma intensidade (densidade de força  $\rho$  idêntico), aumenta em cerca de 6% a diferença de perdas no caso que contempla o acoplamento mecânico em relação ao caso *stressless*. Esse impacto pode ser observado localmente através da distribuição de  $\Delta W_{h,i}$ , apresentada na Figura 56, cujo valores também estão normalizados pela base cem.

Tabela 7 – Resultados comparativos das perdas por histerese - caso Fx+Fy.

Meio	Harmônico		
	$W_h^o$ [W/m]	$W_h'$ [W/m]	$\Delta W_h$ [%]
Estatore	48.28	59.22	22.66
Rotor	19.19	19.19	0.00

Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

Figura 56 – Distribuição da diferença de perdas por histerese  $\Delta W_{h,i}$  nos elementos da malha do estator - método de cálculo harmônico (H).



Fonte – Elaborado pelo autor (2021)

O conjunto adicional de resultados apresentados nesse Apêndice demonstra as distintas possibilidades de simulações mecânicas que podem ser estudadas, bem como apresenta os impactos finais obtidos nas simulações magnéticas que fazem uso da implementação computacional desenvolvida nesse trabalho.