

ELE085 - Conversores Eletromecânicos

Aluno: Eduardo Henrique Basilio de Carvalho
Turno: TN-Noturno

Aluno: Renan Neves da Silva
Turno: TN-Noturno

1 Cálculos Iniciais e Análise do Material

1.1 Item 1: Número de Espiras

O número do primeiro aluno da dupla (Eduardo) na lista de chamada é 7. De acordo com a regra para números entre 1 e 10, o número de espiras (N) é calculado como 55 vezes o número do aluno.

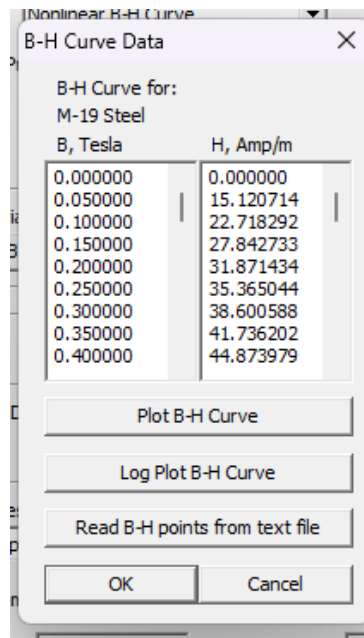
$$N = 55 \times 7 = 385 \text{ espiras} \quad (1)$$

O número de espiras adotado para o projeto é de **385 espiras**.

1.2 Item 2: Análise do Aço-Silício M-19

1.2.1 Itens 2a, 2b e 2c: Curva B-H

A curva de magnetização do material M-19 foi obtida na biblioteca do FEMM. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os dados e os gráficos da curva, que são a base para a análise das propriedades do material.



B, Tesla	H, Amp/m
0.000000	0.000000
0.050000	15.120714
0.100000	22.718292
0.150000	27.842733
0.200000	31.871434
0.250000	35.365044
0.300000	38.600588
0.350000	41.736202
0.400000	44.873979

Figura 1: Tabela de dados da curva B-H para o M-19 Steel.

Com base na análise dos dados:

- **Faixa linear de H:** A faixa utilizável onde a permeabilidade magnética se mantém aproximadamente constante e elevada, é a região antes do início da saturação. Analisando o gráfico da curva B-H, observa-se que a região de alta inclinação (quase linear) se estende de $H = 0$ até aproximadamente $H \approx 2500 \text{ A/m}$.
- **Permeabilidade magnética (μ):** O valor da permeabilidade na região linear pode ser estimado pela própria janela de propriedades do material no FEMM, que indica uma permeabilidade relativa de $\mu_r = 4416$. A permeabilidade absoluta é $\mu = \mu_r \times \mu_0 = 4416 \times (4\pi \times 10^{-7}) \approx 0.00555 \text{ H/m}$.

- **”Joelho”da curva:** O joelho, ponto onde a curva começa a ”achatar”indicando o início da saturação, foi identificado visualmente no gráfico de escala linear. Este ponto ocorre em aproximadamente $B \approx 1.7$ T, que corresponde a uma intensidade de campo de $H \approx 2500$ A/m.

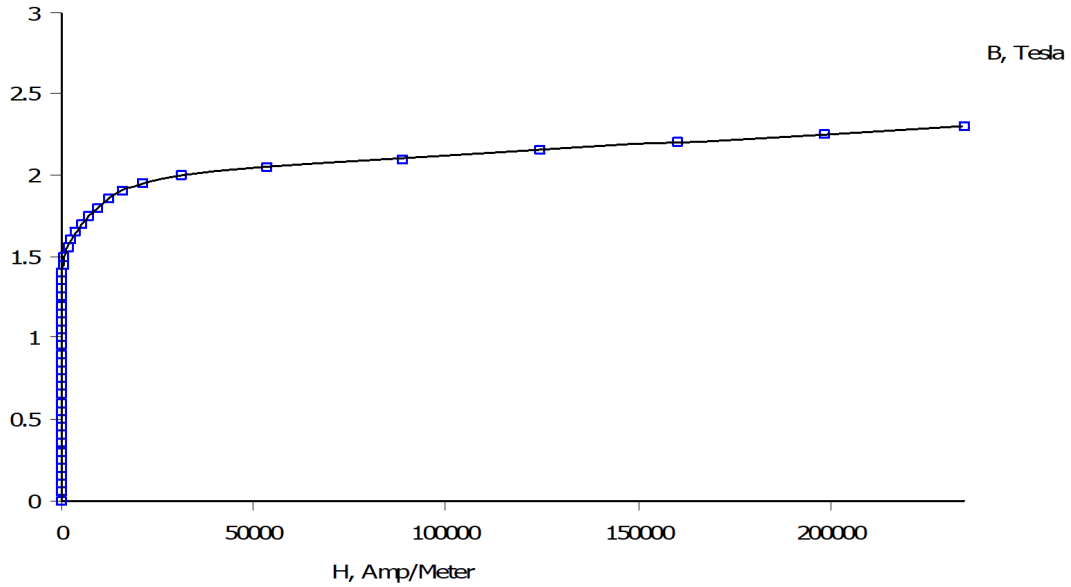


Figura 2: Curva de magnetização $B \times H$ (escala linear).

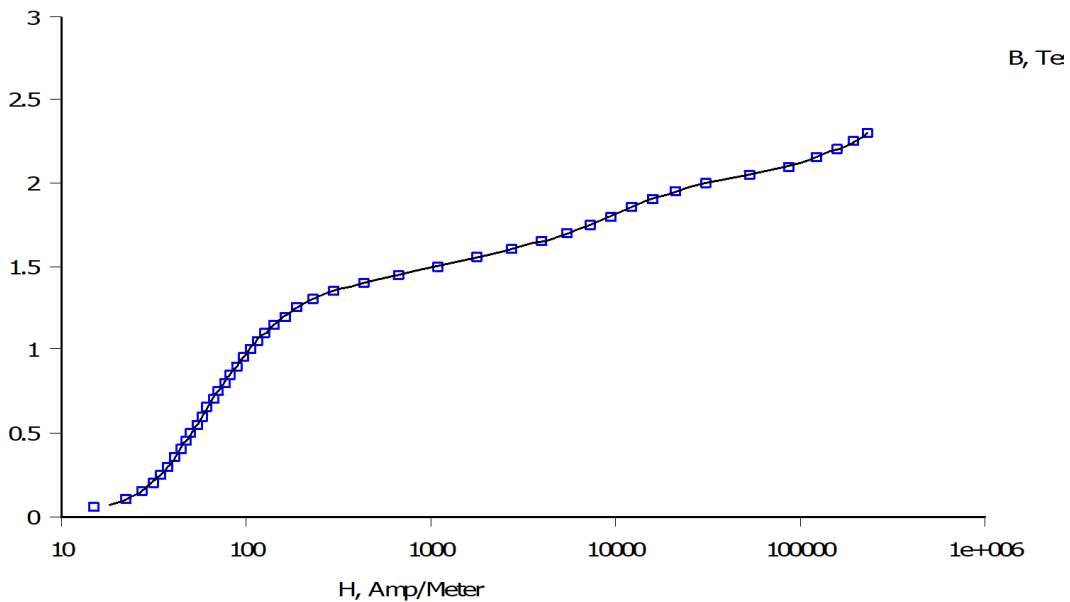


Figura 3: Curva de magnetização $B \times H$ (escala logarítmica).

1.2.2 Item 2d: Caminho Magnético Médio (l_c)

O caminho magnético médio (l_c) foi calculado como a linha central do núcleo. A largura das pernas verticais é de $(150 - 50)/2 = 50$ mm, e a das pernas horizontais é de $(150 -$

$$100)/2 = 25 \text{ mm.}$$

$$l_{horizontal} = 150\text{mm} - 2 \times \left(\frac{50\text{mm}}{2}\right) = 100\text{mm} \quad (2)$$

$$l_{vertical} = 150\text{mm} - 2 \times \left(\frac{25\text{mm}}{2}\right) = 125\text{mm} \quad (3)$$

$$l_c = 2 \times l_{horizontal} + 2 \times l_{vertical} = 200 + 250 = 450\text{mm} = \mathbf{0.45m} \quad (4)$$

1.2.3 Item 2e e 2f: Corrente e Bitola do Fio

A corrente (i) que gera a intensidade de campo H do joelho da curva ($H \approx 2500 \text{ A/m}$) é calculada pela Lei de Ampère para circuitos magnéticos:

$$i = \frac{H \times l_c}{N} = \frac{2500 \text{ A/m} \times 0.45 \text{ m}}{385} \approx \mathbf{2.92 \text{ A}} \quad (5)$$

Para selecionar a bitola, adotou-se uma densidade de corrente segura de $J = 3 \text{ A/mm}^2$. A área de cobre mínima necessária é $A_{min} = i/J = 2.92/3 \approx 0.974 \text{ mm}^2$. Consultando a tabela AWG, o fio AWG 18 (0.82 mm^2) é insuficiente. A próxima bitola, **AWG 17**, possui área de 1.04 mm^2 , sendo a escolha adequada.

Por escolha de projeto escolhemos o AWG 17 e não o AWG 16 que já tem implementação nativa no femm. O AWG 16 seria correto também pois sua especificação também suporta os cálculos, porém como escolher ele significaria escolher um fio mais grosso, e que consequentemente ocupa mais espaço na janela do enrolamento e afetaria o fator de ocupação. Para tal, optamos por criar um material novo no femm para o AWG 17 para conseguir usá-lo, conforme implementação abaixo:

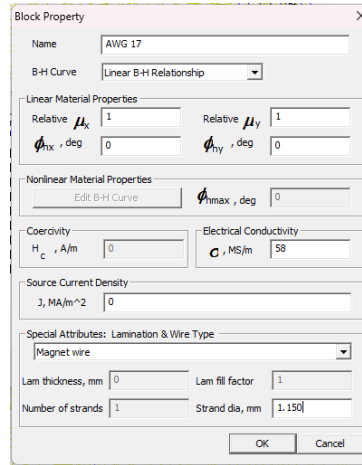


Figura 4: Janela de criação do AWG 17

1.2.4 Item 2g: Fator de Ocupação

O fator de ocupação é a razão entre a área total de cobre e a área da janela disponível para o enrolamento.

- **Área da Janela:** $A_{janela} = 100\text{mm} \times 50\text{mm} = 5000\text{mm}^2$
- **Área Total de Cobre:** $A_{cobre} = N \times A_{fio} = 385 \times 1.04 \text{ mm}^2 = 400.4\text{mm}^2$
- **Fator de Ocupação:** $\frac{A_{cobre}}{A_{janela}} \times 100\% = \frac{400.4}{5000} \times 100\% = \mathbf{8.01 \%}$

2 Item 4: Simulação com Metade da Corrente

Para esta simulação, utilizou-se uma corrente de $i = 1.46$ A.

2.1 Item 4a: Cálculo Analítico de B e H

2.1.1 Cálculo da Intensidade de Campo (H)

O cálculo de H se baseia na Lei de Ampère para circuitos magnéticos, onde a força magnetomotriz ($FMM = N \times i$) é igual ao produto da intensidade de campo (H) pelo caminho magnético médio (l_c).

$$H = \frac{N \times i}{l_c} \quad (6)$$

Utilizando os valores já definidos:

- $N = 385$ espiras
- $i = 1.46$ A
- $l_c = 0.45$ m

Temos:

$$H = \frac{385 \times 1.46 \text{ A}}{0.45 \text{ m}} \approx 1249.1 \text{ A/m} \quad (7)$$

2.1.2 Cálculo da Densidade de Fluxo (B)

Com o valor de H, o método analítico correto consiste em consultar a curva B-H do material (Figura 3) para encontrar o valor de B correspondente. Para um H de aproximadamente 1249 A/m, o valor de B na curva do aço M-19 é de:

$$B \approx 1.6 \text{ T} \quad (8)$$

Seguindo as instruções do enunciado, foi feito o desenho no femm e traçado o gráfico B e H abaixo

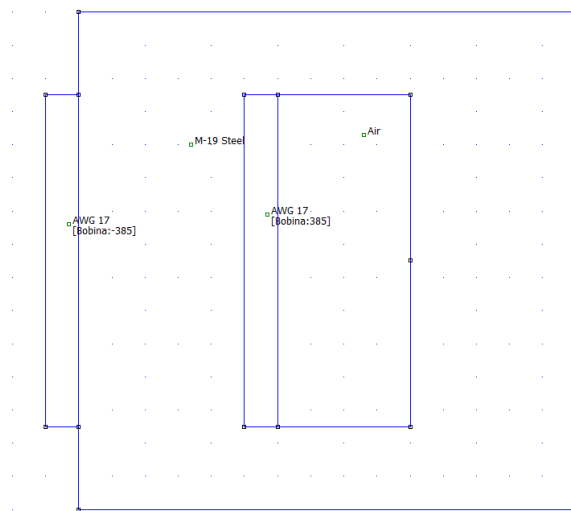
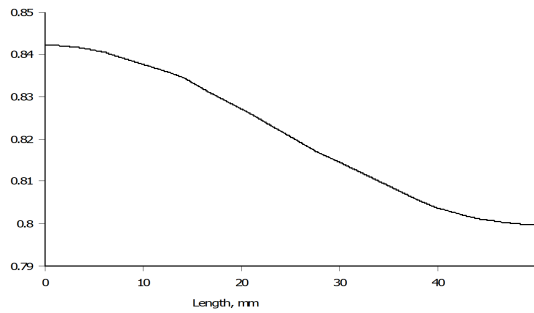
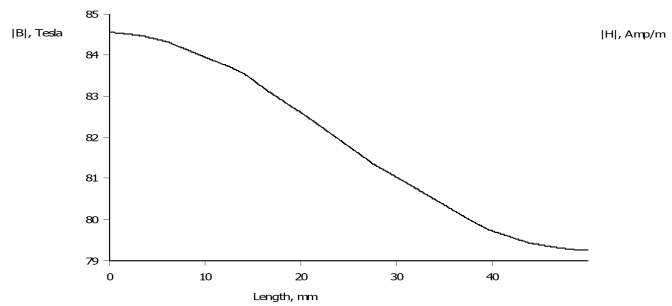


Figura 5: Desenho no FEMM do indutor sem gap



(a) Gráfico de B



(b) Gráfico de H

Figura 6: Gráficos de contorno de B e de H.

2.2 Item 4c: Discussão da Validade do Caminho Médio

A Tabela 1 compara os resultados analíticos e simulados.

Tabela 1: Comparação entre valores analíticos e simulados para B e H.

Grandeza	Valor Analítico	Valor Simulado (FEMM)
H (A/m)	≈ 1249	≈ 82
B (T)	≈ 1.6	≈ 0.82

A discrepância, especialmente em H, demonstra a limitação do método do caminho médio. O método superestima o valor de H nas seções retas do núcleo, pois não leva em conta a concentração do esforço magnético (H) nos cantos do núcleo. A simulação por elementos finitos (FEMM) fornece um resultado local muito mais preciso.

2.3 Item 4d: Comparação da Indutância

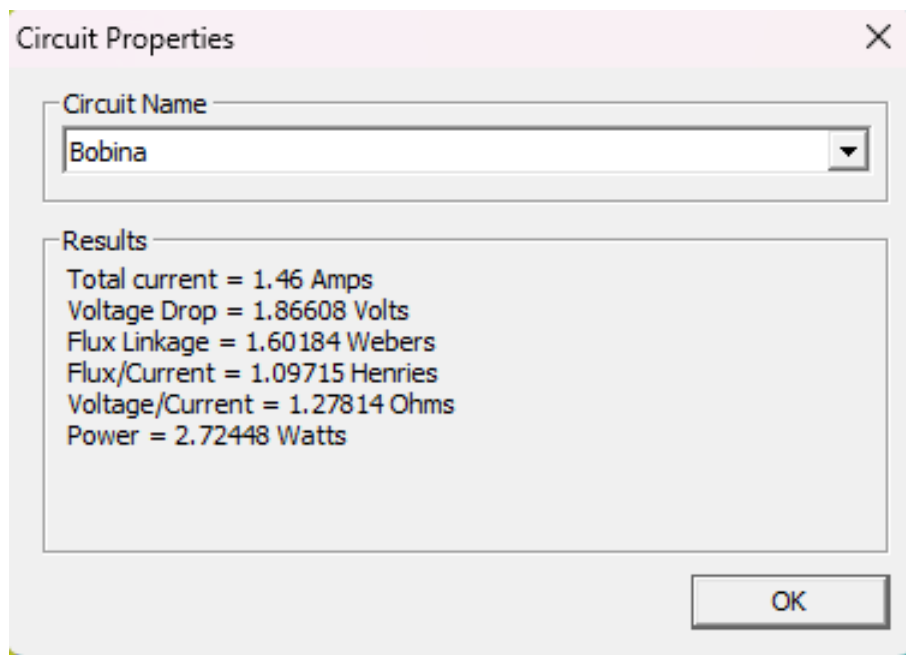


Figura 7: Enter Caption

- **Analítica:** $L \approx 2.11$ H
- **Simulação (FEMM):** $L_{femm} = 1.096$ H

O valor da simulação é considerado o mais preciso. A diferença expressiva reforça a imprecisão do modelo analítico simplificado para este caso.

3 Item 5: Simulação com Múltiplas Correntes

Nesta seção, o indutor foi simulado para 7 valores de corrente, de 25% a 175% da corrente de saturação.

3.1 Item 5a: Prints da Densidade de Fluxo Magnético (B)

As figuras a seguir mostram os mapas de densidade de fluxo. É visível que, com o aumento da corrente, a saturação do núcleo se intensifica.

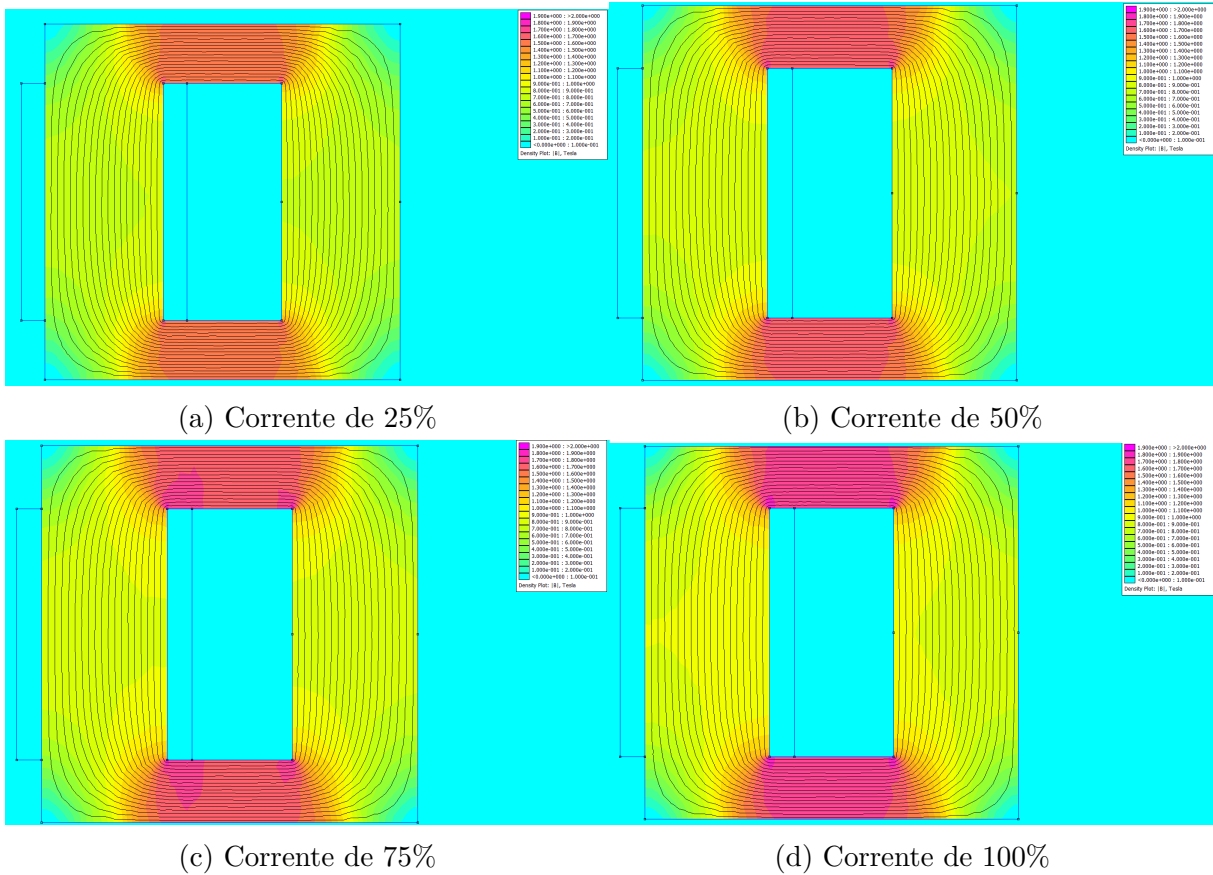


Figura 8: Mapas de densidade de fluxo (sem entreferro) para correntes até o ponto de saturação nominal.

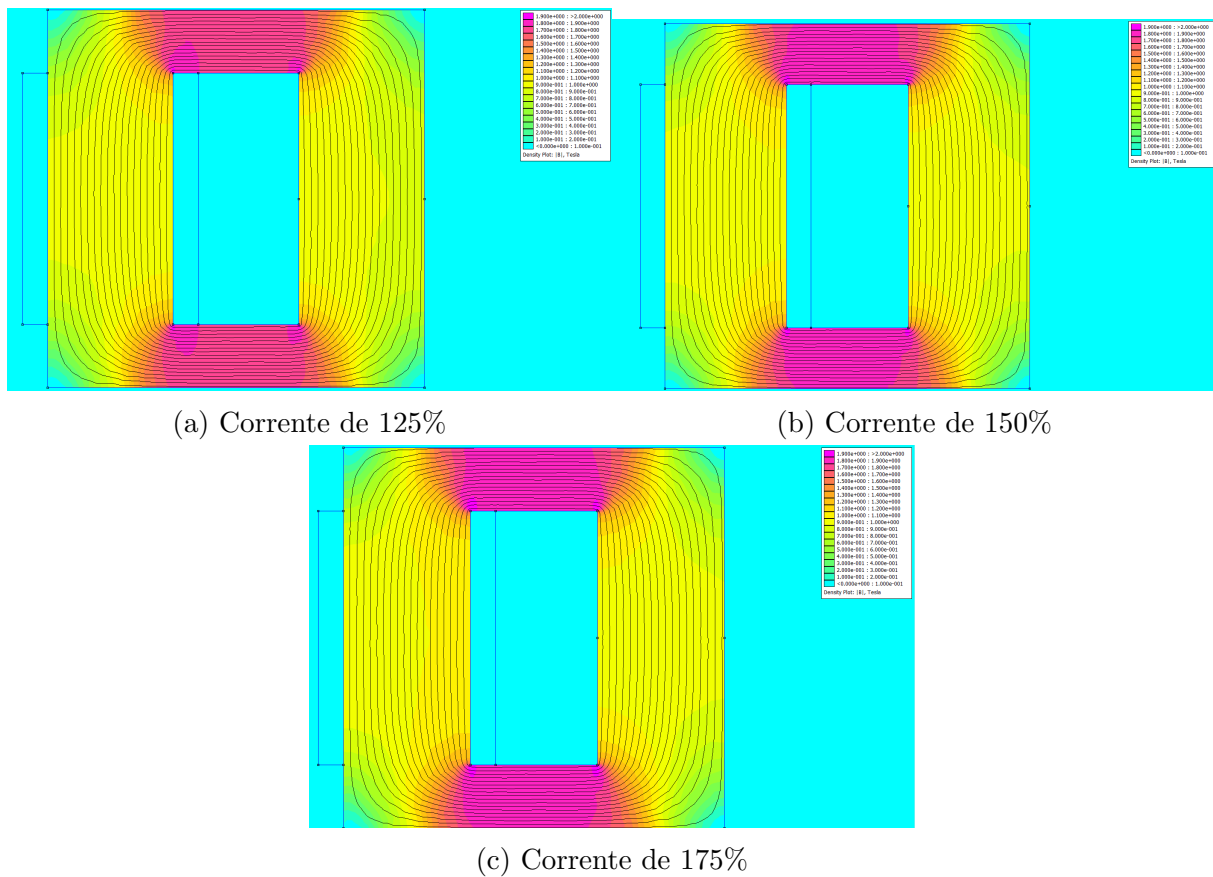


Figura 9: Mapas de densidade de fluxo (sem entreferro) para correntes acima do ponto de saturação nominal.

3.2 Item 5b: Gráfico da Indutância em Função da Corrente

O resultado da varredura de corrente é plotado na Figura 10.

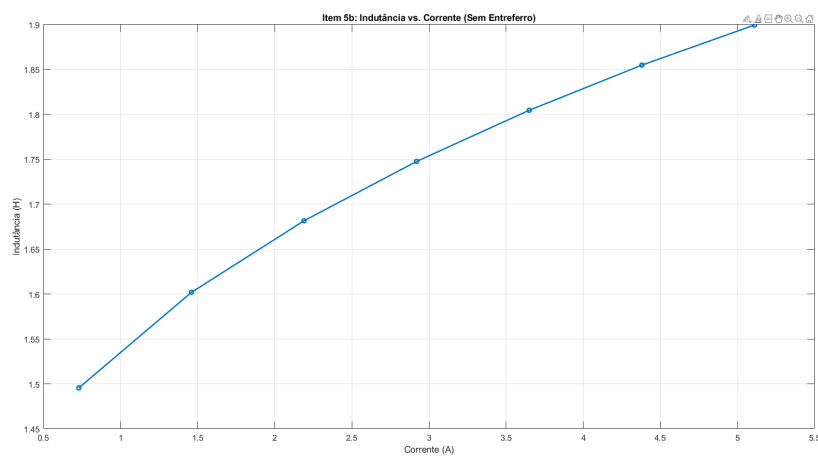


Figura 10: Variação da indutância em função da corrente de excitação.

3.3 Item 5c: Análise da Variação da Indutância

Sim, a indutância variou com a corrente, de 1.49 H para 1.88 H. A razão para essa variação está na **não linearidade do material ferromagnético**. A indutância (L) depende da permeabilidade magnética (μ), que não é constante. Ao aumentar a corrente, o ponto de operação se move ao longo da curva B-H, alterando a permeabilidade efetiva e, conseqüentemente, a indutância.

4 Itens 6 e 7: Simulação do Indutor com Entreferro

Nesta etapa, o modelo foi modificado manualmente para incluir dois entreferrros de 1 mm, conforme a Figura 6 do enunciado. A simulação foi executada com a mesma corrente de $i = 1.46$ A para análise comparativa.

4.1 Item 7a: Fenômeno de Espraçamento

O espraçamento (*fringing flux*) é a curvatura das linhas de fluxo magnético ao passarem pelo entreferro de ar, uma região de alta relutância. Isso ocorre porque o fluxo busca o caminho de menor relutância, espalhando-se por uma área maior que a área geométrica da seção reta do núcleo. A Figura 11 ilustra este fenômeno, onde as linhas de fluxo se curvam para fora do gap.

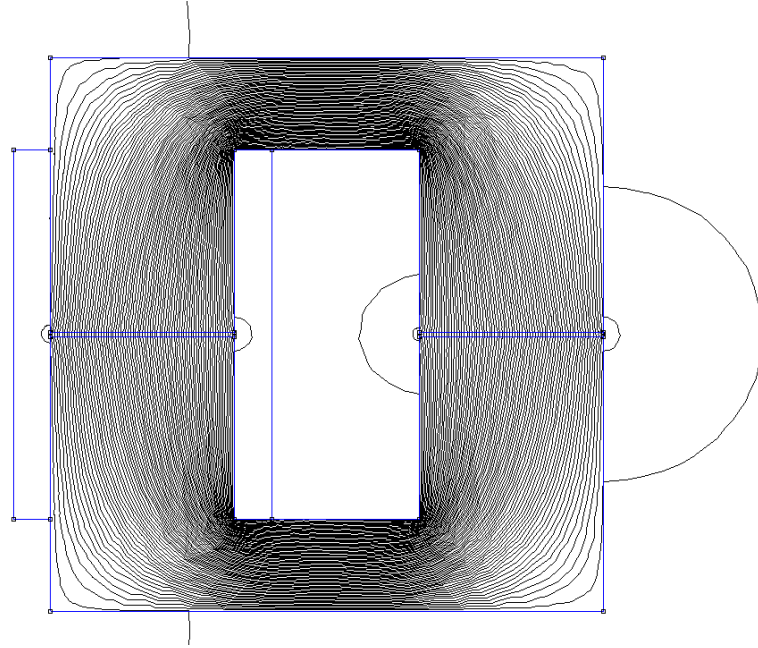


Figura 11: Visualização do fenômeno de espraçamento no entreferro.

4.2 Item 7b: Cálculo Analítico com Entreferro

O cálculo analítico para o indutor com entreferro assume que a relutância do circuito é dominada pelos gaps ($\mathcal{R}_{total} \approx 2 \times \mathcal{R}_{gap}$).

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{gap} &= \frac{l_{gap}}{\mu_0 \times A_c} = \frac{0.001}{(4\pi \times 10^{-7}) \times 0.005} \approx 159155 \text{ A.e/Wb} \\ \mathcal{R}_{total} &\approx 2 \times 159155 = 318310 \text{ A.e/Wb} \\ FMM &= N \times i = 385 \times 1.46 = 562.1 \text{ A.e} \\ \Phi &= \frac{FMM}{\mathcal{R}_{total}} = \frac{562.1}{318310} \approx 0.001766 \text{ Wb} \\ B_{analitico} &= \frac{\Phi}{A_c} = \frac{0.001766}{0.005} \approx \mathbf{0.353 \text{ T}}\end{aligned}$$

Para este valor de B, consultando a curva B-H do material, o H correspondente no aço é de aproximadamente **41.7 A/m**.

4.3 Itens 7c, 7d e 7e: Análise e Comparação de B e H

Foram gerados gráficos de contorno para analisar os valores de B e H no aço e no entreferro.

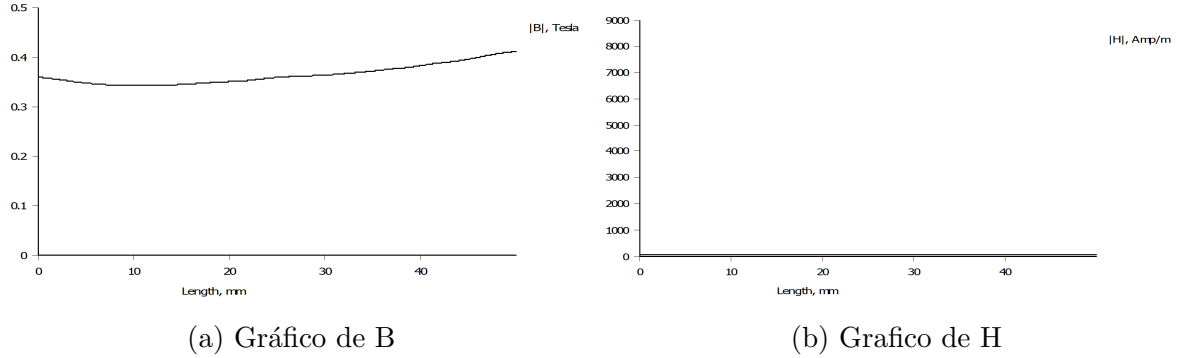


Figura 12: Gráficos de B e H acima do entreferro.

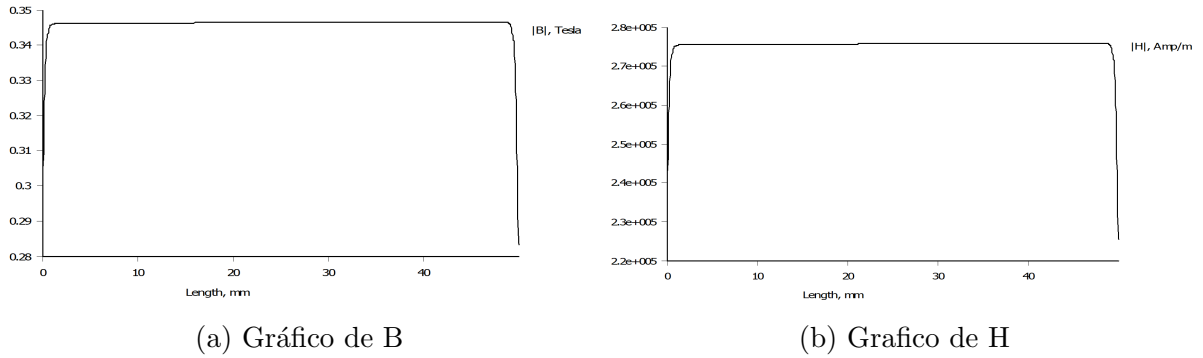


Figura 13: Gráficos de B e H dentro do entreferro.

A Tabela 2 resume e compara os resultados.

Tabela 2: Comparação final de B e H para o indutor COM entreferro.

Grandeza	Valor Analítico	Valor Simulado (FEMM)
B no Aço (T)	≈ 0.353	≈ 0.37
H no Aço (A/m)	≈ 41.7	≈ 45
B no Gap (T)	≈ 0.353	≈ 0.345
H no Gap (A/m)	$\approx 280,000$	$\approx 275,000$

A concordância entre os valores é excelente, validando o modelo analítico para este caso. A análise (item 7d) mostra que B é praticamente contínuo, enquanto H é milhares de vezes maior no ar devido à sua baixíssima permeabilidade.

4.4 Item 7f: Comparação da Indutância com Entreferro

A indutância do novo modelo foi comparada.

- **Analítica:** $L = N^2 / \mathcal{R}_{total} = 385^2 / 318310 \approx 0.465$ H
- **Simulação (FEMM):** $L_{femm} = 0.480$ H

4.5 Item 7g: Equivalência de Indutância com Aumento de Espiras

Nesta seção, calcula-se o novo número de espiras (N_{novo}) necessário para que o indutor com entreferro atinja a mesma indutância do modelo original sem entreferro.

O objetivo é atingir a indutância alvo de $L_{alvo} = 1.097$ H (resultado da simulação do item 4d). A fórmula da indutância pode ser rearranjada para encontrar o novo número de espiras:

$$N_{novo} = \sqrt{L_{alvo} \times \mathcal{R}_{total}} \quad (9)$$

Utilizando a relutância total calculada para o núcleo com entreferro ($\mathcal{R}_{total} \approx 318310$ A.e/Wb):

$$N_{novo} = \sqrt{1.097 \times 318310} \approx \sqrt{349186} \approx 590.9 \quad (10)$$

Portanto, seriam necessárias aproximadamente **591 espiras**.

A segunda parte da questão é verificar se este novo número de espiras cabe na janela do núcleo. Para isso, recalcula-se o fator de ocupação:

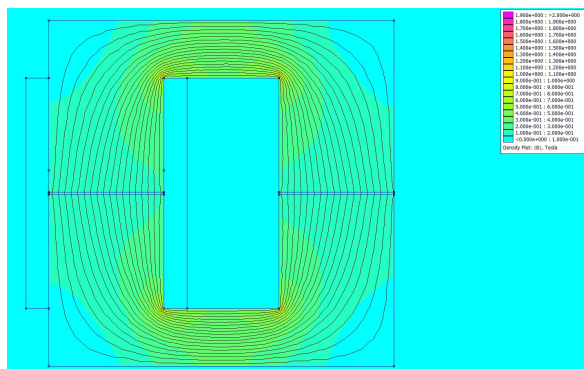
- **Nova Área Total de Cobre:** $A_{cobre_novo} = 591 \times 1.04 \text{ mm}^2 \approx 614.6 \text{ mm}^2$
- **Fator de Ocupação Novo:** $\frac{614.6 \text{ mm}^2}{5000 \text{ mm}^2} \times 100\% \approx 12.3\%$

Conclusão: Sim, o novo número de espiras cabe com folga no núcleo, pois o fator de ocupação de 12.3% ainda é um valor baixo.

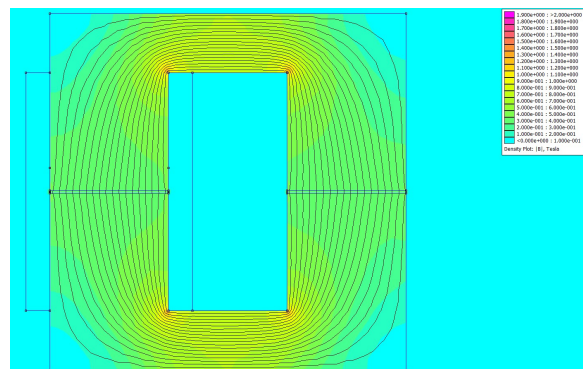
5 Item 8: Simulação com Entreferro (Múltiplas Correntes)

5.1 Item 8a: Prints da Densidade de Fluxo Magnético (B)

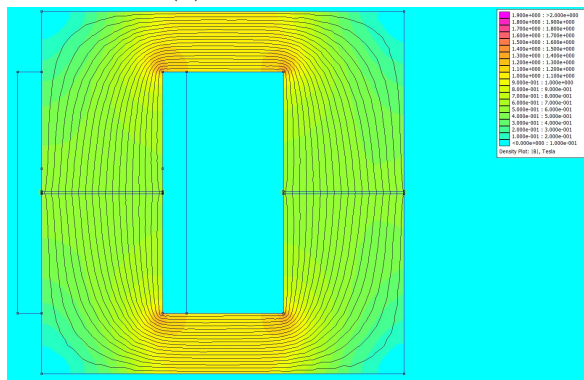
Foi realizada uma nova varredura de corrente para o indutor com entreferro. As figuras a seguir mostram a evolução da densidade de fluxo no núcleo com o aumento da corrente.



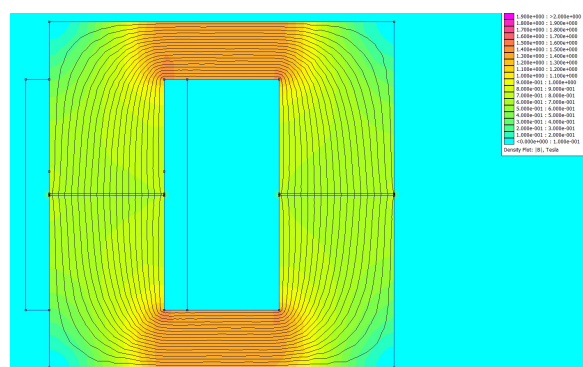
(a) Corrente de 25%



(b) Corrente de 50%

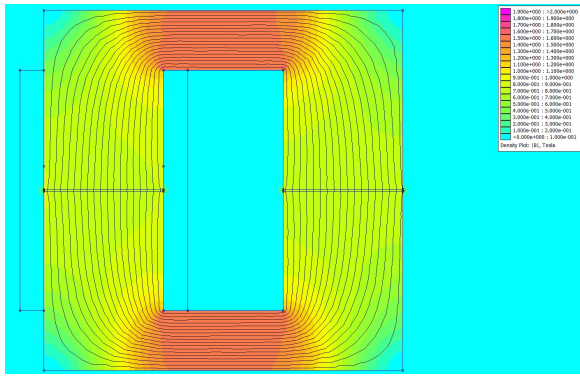


(c) Corrente de 75%

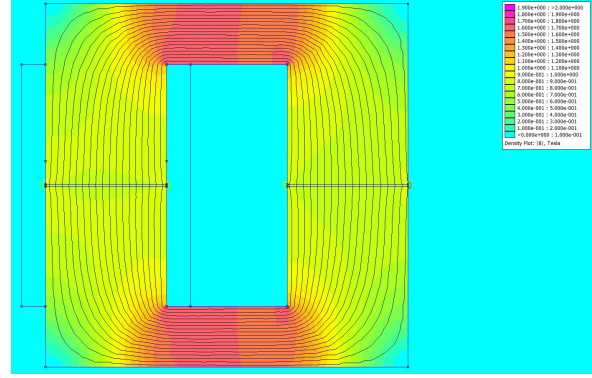


(d) Corrente de 100%

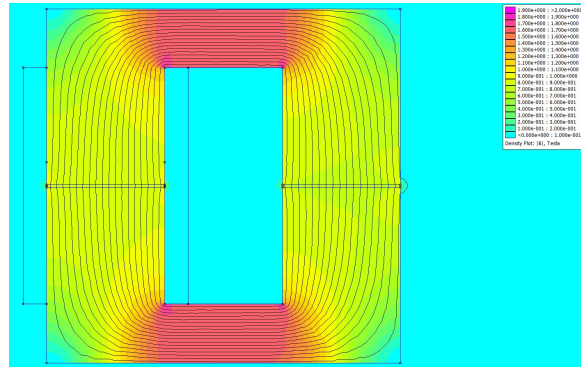
Figura 14: Mapas de densidade de fluxo (com entreferro) para correntes até o ponto de saturação nominal.



(a) Corrente de 125%



(b) Corrente de 150%



(c) Corrente de 175%

Figura 15: Mapas de densidade de fluxo (com entreferro) para correntes acima do ponto de saturação nominal.

5.2 Item 8b: Gráfico da Indutância em Função da Corrente

O resultado da varredura de corrente para o indutor com entreferro é plotado na Figura 16.

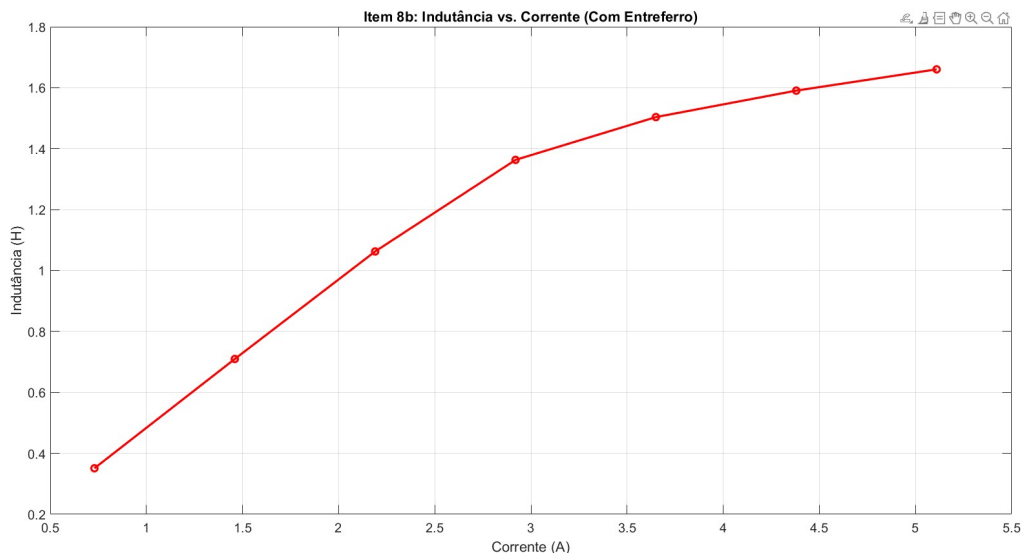


Figura 16: Variação da indutância com a corrente (COM Entreferro).

5.3 Item 8c, 8d e 8e: Análise Final

8c) A indutância do núcleo com entreferro também variou com a corrente (de 0.35 H a 1.66 H), e os resultados foram muito diferentes do item 5. A indutância geral é menor, mas sua variação percentual é maior na faixa analisada. Isso ocorre porque, embora a relutância do gap domine, a variação da permeabilidade do aço com a corrente ainda altera a relutância total do circuito.

8d) Para atingir a densidade de fluxo de saturação ($B \approx 1.7$ T), seria necessária uma corrente superior a 5.11 A (175%), pois nesse ponto o B máximo observado foi de aproximadamente 1.5 T.

8e) A principal vantagem do entreferro é o **aumento da capacidade de corrente DC** antes da saturação. O núcleo sem gap saturou em ≈ 2.92 A, enquanto o com gap não saturou nem com 5.11 A. Isso torna o indutor útil para aplicações com correntes mais elevadas. Adicionalmente, o comportamento do indutor se torna mais linearizado em altas correntes, pois a relutância constante do gap domina o circuito. A grande desvantagem é a significativa **redução do valor da indutância** para uma mesma corrente de operação.