



BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES

ENERGY BALANCE OF A MECHANICAL METHOD FOR DEMAGNETIZING PERMANENT MAGNETS

BALANCE DE ENERGÍA DE UN MÉTODO MECÁNICO PARA LA DESMAGNETIZACIÓN DE IMANES PERMANENTES

Renato Ricardo Antonio Linke¹

e432854

<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i3.2854>

PUBLICADO: 03/2023

RESUMO

Imãs permanentes podem ser destruídos por certas manipulações mecânicas impróprias que os desmagnetizam, reduzindo a sua indução e, conseqüentemente, sua energia interna. Neste ensaio apresenta-se uma manipulação mecânica cíclica de ação dupla, avaliando-se o balanço de energia das forças mecânicas e magnéticas envolvidas ao longo do procedimento todo, notando-se uma pequena liberação de energia do imã sob a forma de trabalho mecânico.

PALAVRAS - CHAVE: Imãs. Desmagnetização mecânica. Energia. Física dos materiais.

ABSTRACT

Permanent magnets could be destroyed by some improper mechanical handlings, reducing their induction and internal energy. The present paper introduces a double mechanical handling cycle, valuating the energy balance of the respective mechanical and magnetic forces along the complete process, resulting in a small energy left of the magnet as a mechanical work.

KEY WORDS: *Magnets. Mechanical demagnetization. Energy. Physics of materials.*

RESUMEN

Los imanes permanentes pueden ser destruidos por ciertas manipulaciones mecánicas improprias que los desmagnetizam, reduciendo su inducción y, en consecuencia, su energía interna. Este ensayo presenta una manipulación cíclica de doble acción, evaluando el balance de energía de las fuerzas mecánicas y magnéticas involucradas a lo largo de todo el procedimiento, notando una pequeña liberación de energía del imán en forma de trabajo mecánico.

PALABRAS CLAVE: *Imanes. Desmagnetización mecánica. Energia. Física de los materiales.*

1. INTRODUÇÃO

O Dr. M. McCaig, do *Central Research Laboratory*, em Sheffield, Inglaterra, publicou em 1956 no *Journal of Scientific Instruments*, um artigo sobre a desmagnetização de alguns tipos de imãs permanentes em formato de barras em contato com corpos ferromagnéticos, sob várias circunstâncias de manipulações mecânicas, apresentando os respectivos gráficos da redução de sua indução em função da natureza e da frequência destas manipulações.

O presente ensaio se baseia nos resultados de desmagnetização por uma manipulação mecânica específica com imãs de AlNiCo5, especialmente sensíveis à desmagnetização, em formato

¹ Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo - USP e com mestrado em Física Aplicada. Especialização profissional em Técnicas de Energia e Novas Tecnologias na Alemanha. Especialização profissional em Controle e Medição de Emissões Veiculares na Alemanha e na Califórnia. Aposentado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

de barra e, por se basear numa série de resultados conclusivos de experiências já conduzidas e relatadas por McCaig, não inclui atividades experimentais.

O objetivo reside em apresentar um procedimento mecânico, baseado nos experimentos de McCaig, no qual se desmagnetiza um ímã de AlNiCo5 em forma de barra através de manipulações cíclicas, analisando, através da redução do seu campo magnético, os decréscimos das energias envolvidas.

Inicialmente são apresentadas alguns conceitos e propriedades de ímãs permanentes úteis para um melhor entendimento deste trabalho.

1.1. CAMPOS E ENERGIA ACUMULADA EM UM IMÃ PERMANENTE

Um ímã permanente possui energia acumulada tanto em seu campo magnético interno B , como no seu externo H lançado no espaço, oriunda da energia empregada para se imantar o mesmo.

Os ímãs, para alcançarem a sua indução de saturação (B_s), necessitam de muito mais energia do que conseguem armazenar.

Ímãs de AlNiCo alcançam a sua indução de saturação aplicando-lhes um campo externo $H_s = 4 \times 10^5$ (A/m), aproximadamente, sendo necessária a energia de 100 kJ/m^3 , (STEINGROEVER, 1992) dada pela equação:

$$E_s = (1/2) 10^6 \mu_0 (H_s)^2 V \quad (1)$$

onde $\mu_0 = 125,66 \times 10^{-8}$ (V s / A m) e V é o volume do ímã (em m^3).

A energia acumulada por um ímã permanente é calculada a partir do segundo quadrante do gráfico de sua curva de indução de desmagnetização (PARKER; STUDDERS, 1962; FARIA; LIMA, 2005), como mostrado na figura 1.

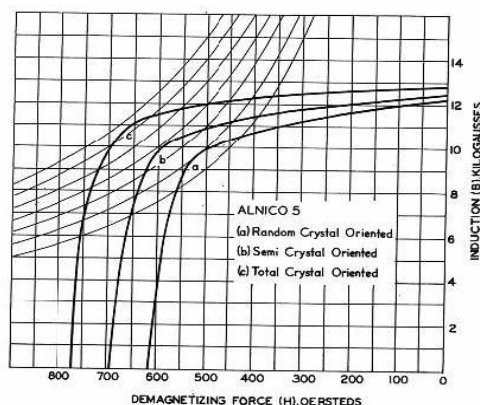


Figura 1: Curvas de desmagnetização para ímãs de AlNiCo 5 (Parker, Studders).

Na curva de desmagnetização de um ímã (Força de Desmagnetização H versus Indução B), o produto de cada valor de intensidade de seu campo B pelo respectivo valor do campo



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

desmagnetizante H fornece um valor de energia, sendo que ao produto $(BH)_{MAX}$ é atribuída a energia máxima estocada no imã (PARKER; STUDDERS, 1962; FARIA; LIMA, 2005):

Imãs de AlNiCo5 com orientação cristalina randômica (ou isotrópicos) possuem uma indução remanente B_r de, aproximadamente, 12250 G e força coerciva H_c em torno de 620 Oe, cujo $(BH)_{MAX}$ corresponde à $(10 \text{ kG} \times 500 \text{ Oe})$, ou seja, aproximadamente, 40 kJ/m^3 (PARKER; STUDDERS, 1962; FARIA; LIMA, 2005).

A energia armazenada num imã permanente em formato de cilindro (Lang da Silveira), é dada, aproximadamente, por:

$$E \approx 1,3 \cdot 10^6 D^2 L B^2 \quad (2)$$

onde B é a indução (ou magnetização) remanente no centro da face da extremidade do imã, D o diâmetro do cilindro e L o seu comprimento. Note-se que a energia é função quadrática da indução ou magnetização do imã.

Podemos usar esta equação, dentro de aproximações, também para imãs com formato em barra com seção quadrática, considerando-se que, uma barra retangular com lados " D " e comprimento " L " possui, aproximadamente, 12,83 % mais volume do que um cilindro com o mesmo diâmetro " D " e comprimento " L ".

Em imãs de polos ou extremidades abertas, não fechadas por uma armadura de material ferromagnético que "canalize" seu campo externo, há um efeito desmagnetizante natural, pois forma-se internamente, a partir da superfície livre do polo N, um campo em sentido oposto ao da magnetização e proporcional à esta, que acaba por enfraquecer e desmagnetizar o imã ao longo do tempo. Este fator de desmagnetização para imãs em forma de cilindro (podendo, dentro de aproximações, ser assumido também para barras), é de 4% para relação c/d (comprimento/diâmetro) de 5; de 1,7% para c/d igual a 10 e de 0,06% para c/d de 20 (FARIA; LIMA, 2005).

Este fenômeno faz com que, em imãs cilíndricos ou em forma de barras, metade das linhas de indução presentes na seção transversal no meio do imã (ou plano neutro) saia pelas faces da extremidade (indo externamente à face oposta) e a outra metade saia pelas laterais (FARIA; LIMA, 2005), conforme mostrado na figura 2. A indução magnética de um imã é sempre referenciada ao seu plano neutro.

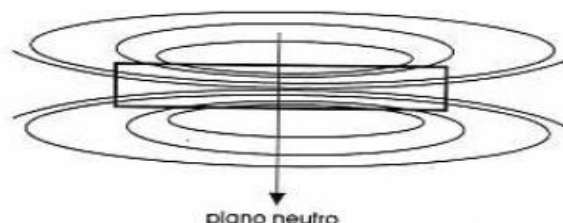


Figura 2: Linhas de indução em uma barra magnetizada (Faria, Lima).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

Assim, um ímã de AlNiCo5, em formato de barra, com lados de 2 cm e comprimento de 10 cm, com uma indução magnética de 1,225 T em seu plano neutro ou 0,6125 T na região central da superfície de suas extremidades, possui acumulado uma energia de, aproximadamente, 19,5 J ou, no máximo, 22 J se considerarmos a correção de volume de 12,83 % do cilindro para a barra retangular.

1.2. LIMITAÇÃO DA FORÇA DE ADESÃO OU PORTANTE DE UM IMÃ PERMANENTE

Analisemos a força de atração de um ímã em formato de ferradura sobre uma armadura. Se aproximarmos a armadura A frontalmente às faces da ferradura, esta, ao encostar, fechará ou canalizará o fluxo magnético, sendo atraída pela denominada força Portante (F_p) ou de adesão, dada, aproximadamente, no ar ou vácuo, por (ENGINEERS EDGE; s. d.; KOSHKIN, SHIRKEVICH, 1986,):

$$F_p = B^2 A / (8 \pi 10^{-7}) \quad (3)$$

sendo: A = área das duas faces do ímã (m^2), por ser ferradura

B = indução magnética na face do ímã (T).

Se aproximarmos agora outra armadura B pela lateral das extremidades, como se denota na figura 3, fecha-se mais um circuito magnético pela extremidade lateral da ferradura, e esta será atraída por uma força de contato F_2 , reduzindo a força portante sobre a armadura A para F_1 , pois o campo magnético, representado por N linhas de campo, que antes se fechavam apenas através da armadura A, agora se dividem entre as armaduras A e B, respectivamente, N_A e N_B (ZUBOV; SHALNOV, 1974).

Se encostarmos mais uma armadura, pelo outro lado, por exemplo, as linhas de campo se dividirão agora entre as três armaduras, reduzindo mais ainda as forças de adesão das duas armaduras anteriores.

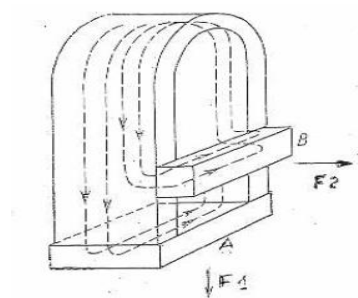


Figura 3: Ímã em forma de ferradura com por duas armaduras (Zubov).

O fluxo magnético (N linhas de campo), segundo a lei de Hopkinson (FOLMER-JOHNSON, 1968), se dividirá entre as armaduras A e B (ou uma terceira, se houver) de modo inversamente proporcional às respectivas Relutâncias ao mesmo e, as forças de adesão de ambas as armaduras serão, então, proporcionais ao quadrado de seus respectivos fluxos magnéticos:

RECIMA21 - Ciências Exatas e da Terra, Sociais, da Saúde, Humanas e Engenharia/Tecnologia

$$(F_1/F_2) = (N_A/N_B)^2 \quad (4)$$

1.3. DESTRUIÇÃO DE IMÃS PERMANENTES POR MANIPULAÇÕES MECÂNICAS

F. G. Baily reportou, na década de 1890, que imãs permanentes forçados a rodar em campos magnéticos externos fixos em uma direção fiducial se desmagnetizam (ASTBURY, 1952).

Esta desmagnetização foi denominada de “Histerese Rotacional” e independe da velocidade angular, mas é fortemente dependente da curva de Indução do imã e de suas propriedades materiais.

Neste caso, fornece-se energia mecânica para girar o imã num campo magnético externo fixo para assim reduzir a sua indução, reduzindo-lhe sua energia estocada.

Imãs de SiFe1 (estudados à época), com magnetização remanente de 0,5 T perdiam $0,15 \times 10^{-3}$ J por ciclo e cm^3 , e com magnetização de 1,0 T perdiam $0,40 \times 10^{-3}$ J por ciclo e cm^3 (ASTBURY, 1952)

Além de choques e vibrações, são conhecidos outros processos de desmagnetização de imãs permanentes saturados através de distorções do seu campo magnético causados por manipulações ou movimentos mecânicos deles em relação a outros imãs ou objetos ferromagnéticos.

M. McCaig estudou alguns destes fenômenos (MCCAIG, 1956; PARKER; STUDDERS, 1962) e reportou que imãs permanentes saturados não devem ser aproximados, encostados ou arrastados sob certas condições, com materiais ferromagnéticos, pois isto altera o padrão de fluxo do seu campo interno, formando polos salientes nas superfícies laterais magnetizadas devidos ao desvio do fluxo normal dentro do imã.

Na figura 4 são apresentadas seis manipulações mecânicas com imãs de AlNiCo5 ou com seus equivalentes comerciais Alcomax (PARKER; STUDDERS, 1962) e suas respectivas curvas de desmagnetização em função da quantidade de movimentos efetuados.

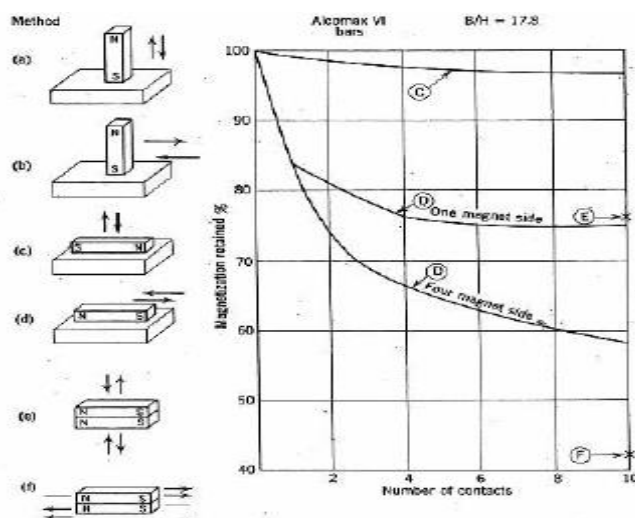


Figura 4: Desmagnetização de imãs AlNiCo5 por ações mecânicas (Parker, Studders)).

Encostar ortogonalmente o imã numa placa ferromagnética em toda a sua extensão lateral, como mostrado no método “c”, causa uma desmagnetização de, aproximadamente, 3 % em 10



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

aproximações, o que já é algo razoável. Isto dá uma redução de, aproximadamente, 0,3 % do seu campo interno original $B_{(0)}$ por aproximação, ou seja:

$$B_{(i)} \approx (1 - 0,003)^i B_{(0)} \quad (5)$$

$$\text{para } i = 10, \text{ tem-se } B_{(10)} \approx 0,970 B_{(0)} \quad (5.a)$$

Como a densidade de energia do imã varia quadraticamente com a intensidade do campo B (vide a equação 2), temos, para este caso, uma redução de energia de, aproximadamente, 0,6 % em cada ciclo, ou seja, sendo $E_{(0)}$ a energia original, a energia remanescente (ER) do imã é dada por:

$$ER_{(i)} \approx (1 - 0,006)^i E_{(0)} \quad (6)$$

$$\text{para } i = 10, \text{ tem-se } ER_{(10)} \approx 0,941 E_{(0)} \quad (6.a)$$

Ou seja, em 10 aproximações o imã permanente perdeu, aproximadamente, 5,9 % de sua energia acumulada originalmente.

A energia perdida pelo imã $EP_{(i)}$ após a realização de “ i ” ciclos, será então dada por:

$$EP_{(i)} = E_0 [1 - (1 - 0,006)^i] \quad (7)$$

A tabela a seguir apresenta a fração de energia perdida do imã, após a realização de “ i ” ciclos, onde se denota que após, aproximadamente, 1000 ciclos o imã foi praticamente destruído.

Tabela: Perda de energia do imã ao longo dos ciclos realizados

CICLO (i)	ENERGIA PERDIDA (%)
0	0,0
1	0,6
10	5,9
115	50,1
500	95,1
1000	99,8

Já as situações como descritas na figura 4 no método “d”, no “e” ou, notadamente, no “f” são muito mais efetivas para a destruição de um imã permanente. Dez movimentos laterais de dois imãs permanentes de polos iguais alinhados e encostados desmagnetizam os mesmos em, aproximadamente, 42%, o que já é muito perceptível.

Nota-se que qualquer ação sobre um imã permanente que altere a direção de seu campo interno acarretará numa redução de sua indução, perdendo energia interna.

RECIMA21 - Ciências Exatas e da Terra, Sociais, da Saúde, Humanas e Engenharia/Tecnologia



2. MANIPULAÇÃO MECÂNICA DUPLA DE UM IMÃ EM DIREÇÕES ORTOGONAIS

Analise o seguinte arranjo: um ímã de AlNiCo 5, saturado, em formato de barra, como mostrado na figura 5, um núcleo em material ferromagnético de mesma largura e espessura da barra magnética (representado por “N”), alinhado frontalmente a um dos extremos do ímã e uma placa também em material ferromagnético de largura maior do que o ímã, podendo ter comprimento maior do que o mesmo, colocada lateralmente, paralelo ao ímã (representada por “P”), tal que, ambas podem estar encostadas ou não simultaneamente no ímã (o núcleo frontalmente e a placa lateralmente) ou alternadamente ao mesmo, o que mudará o comportamento do campo deste ímã.

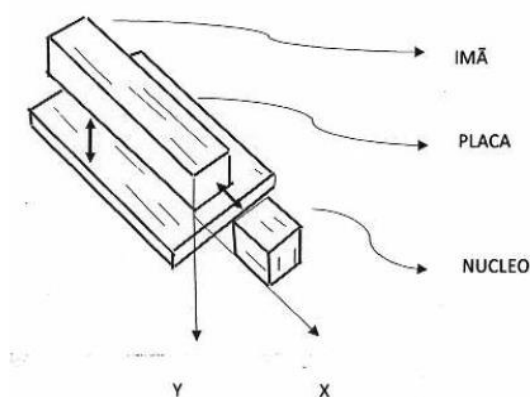


Figura 5: Um núcleo e uma placa movendo-se ortogonalmente em relação ao ímã (Autor)

O núcleo se moverá alinhado ao comprimento do ímã, na direção x, encostando ou se afastando de apenas um dos polos, enquanto a placa se move apenas lateralmente, em sentido ortogonal (y) à direção de movimentos do núcleo, afastando-se ou encostando no ímã, como esquematizado na figura 5.

Inicialmente, o núcleo e a placa encontram-se afastadas do ímã, sendo as distâncias não necessariamente iguais, mas ainda com atuação reduzida das forças magnéticas,

Ao se aproximar a placa ou o núcleo, a energia do campo externo do ímã (H) é convertida em trabalho mecânico e vice-versa. Neste caso, tanto a placa como o núcleo sofrerão uma força de atração magnética que aumentará com o inverso do quadrado da distância à medida que estes se aproximam da superfície do ímã (PARKER; STUDDERS, 1962; FARIA; LIMA, 2005; FOLMER-JOHNSON, 1968), limitada à força de adesão (F_p).

Assim, a força de atração entre o ímã e o núcleo ou a placa será do tipo:

$$F = f(1/x^2) \quad \text{com } F = F_p \text{ para } x = 0 \quad (8)$$

A força de atração, teoricamente, subiria ao infinito quando $x = 0$, o que não é verdadeiro, pois nesta condição a força de atração será igual à força de adesão.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

Essa equação é bastante prática e usada, mas considera o polo magnético do imã concentrado num ponto que se localiza não na superfície, mas dentro do imã (FARIA; LIMA, 2005).

É como se a origem “0” do eixo de coordenadas não estivesse alocado na superfície da extremidade do imã e sim algo para dentro dele, de forma que para a abscissa “x” correspondente à superfície do imã, a força de atração seja igual à força de adesão.

O trabalho efetuado pelo imã sobre o núcleo será dado pela equação:

$$C = \int F(x) dx, \text{ com } F(x) = F_p \text{ para } d = 0 \quad (9)$$

Analisemos agora os seguintes movimentos do núcleo (N) e da placa (P), descritos em etapas como segue:

Etapa inicial (0): o núcleo e a placa afastados do imã, respectivamente no eixo “x” a uma distância “ d_1 ” e no eixo “y” a uma distância “ d_2 ”.

Etapa 1: o núcleo se move ao longo do eixo “x”, da sua posição d_1 até encostar no imã, atraído pela força magnética sobre o núcleo “ F_{NUCLEO} ”, produzindo o imã um trabalho positivo e reduzindo a energia do seu campo (H), conforme a equação:

$$C(1) (d_1 \rightarrow 0) = d_1 \int_0^0 F_{NUCLEO} (x) dx, \text{ sendo } F_{NUCLEO} = F_{PNUCLEO} \text{ para } x = 0 \quad (1)$$

Note-se que o núcleo, ao encostar na extremidade aberta do imã, prolongará praticamente o mesmo, estando sob a ação de um fluxo magnético de $N/2$ linhas de campo do imã.

Etapa 2: a placa se move ao longo do eixo “y” da sua posição inicial “ d_2 ” até encostar no imã, atraída pela força magnética “ F_{PLACA} ”, enquanto o núcleo permanece encostado no imã:

Veza encostada, fecha-se o fluxo pela lateral do imã com N_2 linhas de campo, devendo pela extremidade encostada no núcleo sair N_1 linhas.

Mas, como abordado por McCaig na situação “c” da figura 4, haverá um enfraquecimento do campo do imã com esta aproximação lateral da placa e que destruirá k das N linhas de campo, sobrando, portanto, no imã $(N - k)$ linhas de campo, que se distribuirão entre a placa e o núcleo, ou seja, $N_1 = N_2 = (N - k)/2$.

O núcleo, ao ter reduzido as suas linhas de campo de $N/2$ para $(N - k)/2$, terá a sua força de adesão reduzida de F_p para F'_p , enquanto a placa será aderida à lateral do imã por uma força de adesão $F_{p(PLACA)}$.

Assim, o trabalho produzido pelo imã sobre a placa (reduzindo a energia do seu campo H) ao longo do eixo “y” será:

$$C(2) (d_2 \rightarrow 0) = d_2 \int_0^0 F_{PLACA} (y) dy, \text{ sendo } F_{PLACA} = F_{P(PLACA)} \text{ para } y = 0 \quad (11)$$

Etapa 3: a placa, aderida ao imã por uma força F_p é movida ao longo do eixo “y”, por ação de força mecânica externa igual ou minimamente maior do que a força magnética sobre a placa, até a sua posição original “ d_2 ”, abrindo o fluxo magnético lateral do imã:



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

Assim, o trabalho mecânico externo sobre o imã para deslocar a placa de volta para d_2 será dado por:

$$\mathcal{C}(3) (0 \rightarrow d_2) = \int_0^{d_2} F_{PLACA} (y) dy, \text{ sendo } F_{PLACA} = F_{P(PLACA)} \text{ para } y = 0 \quad (12)$$

A placa, ao ser destacada e afastada da superfície lateral do imã até a sua distância original, fará com que o fluxo magnético seja reconduzido para sua direção longitudinal dentro do imã, aumentando a força de adesão do núcleo de F'_P para F''_P .

Contudo, F''_P será menor do que F_P (original) devido à perda de k linhas do imã, das quais $k/2$ linhas a menos sobre o núcleo.

Agora, o imã está com um campo interno reduzido para $(N - k)$ linhas, saindo metade pelas laterais e a outra metade pelas extremidades.

Etapa 4: o núcleo se move ao longo do eixo "x", por ação de força mecânica externa, destacando-se do imã e retornando a sua posição original " d_1 ".

Inicialmente, atuarão sobre o núcleo encostado na extremidade do imã $(N - k) / 2$ linhas de campo, fazendo com que a força de adesão aumentasse de F'_P para F''_P (com $F''_P < F_P$) devido ao enfraquecimento do campo interno do imã.

Assim, o trabalho mecânico externo sobre o imã será dado por:

$$\mathcal{C}(4) (0 \rightarrow d_1) = \int_0^{d_1} F''_{NUCLEO} (x) dx, \text{ sendo } F''_{NUCLEO} = F''_{P(NUCLEO)} \text{ para } x = 0 \quad (13)$$

Ao início desta etapa, o imã já sofreu a aproximação e o afastamento lateral da placa, o que reduziu o seu campo em, aproximadamente, 0,3 % o que, segundo a equação 3, reduziu a sua força de adesão em, aproximadamente, 0,6 % ou seja, $F''_P = 0,994 F_P$.

Percebe-se que, pelo fato de a força de adesão ter-se reduzido de F_P para um valor menor F''_P , o trabalho dispendido para trazer o núcleo de volta à mesma posição original, de 0 para d_1 , será menor do que o realizado pelo imã para o mesmo ir de d_1 para 0 na 1ª etapa.

3. BALANÇO DE ENERGIA

Analisando-se o balanço energético do imã pelos movimentos do núcleo ao se movimentar de " d_1 " para 0 (etapa 1) e retornar para " d_1 " (etapa 4), tem-se, somando-se as equações 10 e 13:

$$\mathcal{C}(\text{núcleo}) |(0 \rightarrow d_1 \rightarrow 0) = \int_{d_1}^0 F_{NUCLEO} (x) dx + \int_0^{d_1} F''_{NUCLEO} (x) dx \quad (14)$$

e como com $x = 0$ temos $F''_P = 0,994 F_P$:

$$\mathcal{C}(\text{núcleo}) |(0 \rightarrow d_1 \rightarrow 0) = \int_{d_1}^0 F_{NUCLEO} (x) dx - 0,994 \int_0^{d_1} F_{NUCLEO} (x) dx \quad (14.a)$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

Analisando-se agora o balanço energético do imã pelos movimentos da placa ao se movimentar de d_2 para 0 (etapa 2) e retornar para d_2 (etapa 3), tem-se, somando-se as equações 11 e 12:

$$\mathcal{T}(placa) |(0 \rightarrow d_2 \rightarrow 0) = \int_0^{d_2} F_{PLACA}(y) dy + \int_{d_2}^0 F_{PLACA}(y) dy = 0 \quad (15)$$

Assim, para o ciclo completo, envolvendo os trabalhos sobre o núcleo e a placa, nas quatro etapas, teremos como trabalho resultante realizado pelo imã (equações 14.a e 15):

$$\Sigma \mathcal{T}(ciclo) = 0,006 \int_0^{d_1} F_{NUCLEO}(x) dx \quad (16)$$

ou seja, no ciclo completo o imã libera parte de sua energia magnética acumulada sob a forma de trabalho mecânico sobre o núcleo, pois o trabalho da força externa aplicada sobre ele para afastá-lo (etapa 4) é menor do que o trabalho da força magnética que o imã realiza ao atraí-lo (etapa 1).

Note-se também que, nesta polarização lateral do imã na 2ª etapa deste ciclo, desorienta-se microrregiões internas polarizadas dele, o que provoca um aumento da entropia do imã.

Foi analisado apenas o movimento de um núcleo junto à um dos polos do imã, conforme ilustrado na figura 5, mas pode-se acrescentar um segundo núcleo ao outro polo, por cuja superfície entram, respectivamente, a metade das linhas de campo ($N/2$) que saem do primeiro polo do imã, ou vice-versa, o qual apresentará um comportamento análogo ao descrito para o primeiro núcleo.

Realizando-se neste segundo núcleo as mesmas quatro etapas descritas concomitantemente às do primeiro, extrai-se energia deste imã em forma de barra pelos dois polos, ou seja, dobra-se o trabalho útil extraído como indicado pela equação 16, tendo-se, então:

$$\Sigma \mathcal{T}(total\ ciclo) = 0,012 \int_0^{d_1} F_{NUCLEO}(x) dx \quad (17)$$

4. ESTUDO DE CASO

O nosso imã em barra, com seção quadrática de 2 cm de lado e 10 cm de comprimento, estoca cerca de 22 joules (muito pouco em relação a outros meios conhecidos), e reduziria a sua força de adesão sobre cada um dos dois núcleos de 59,71 N para 59,35 N (0,6%) no primeiro ciclo completo, ou seja, a força de adesão foi reduzida em 0,36 N, perdendo o imã também 0,6% de sua energia interna, o que daria 0,132 J no primeiro ciclo, o que, contudo, não corresponde integralmente ao trabalho útil extraído, pois perde-se também parte em calor devido à correntes indutivas internas, ou seja, o trabalho mecânico extraído será menor que este valor.

5. CONCLUSÃO

O método de movimentação apresentado, baseado em uma manipulação destrutiva já descrita por McCaig, reduz a indução magnética de um imã de AlNiCo5 a cada ciclo completo de movimentações, desmagnetizando-o e aumentando a sua entropia, sendo o trabalho realizado pela força magnética do imã ligeiramente maior do que o realizado pela força externa necessária para



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

BALANÇO DE ENERGIA DE UM MÉTODO MECÂNICO PARA DESMAGNETIZAÇÃO DE IMÃS PERMANENTES
Renato Ricardo Antonio Linke

retornar o sistema à situação inicial em cada ciclo, resultando numa pequena extração da energia armazenada no imã sob a forma de trabalho mecânico.

REFERÊNCIAS

ASTBURY, N. F. “**Industrial Magnetic Testing**”. London: The Institute of Physics, 1952, p. 121 e 122.

ENGINEERS EDGE. **Magnetic force Lifting force Equation and Calculator**. [S. l.]: Engineers Edge, s. d. Disponível em: https://www.engineersedge.com/calculators/magnet-lifting/magnetic_force_calculator.htm. Acesso em: 13 dez. 2018.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. “**Introdução ao Magnetismo dos Materiais**”. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005, p. 60; 65; 115; 123; 127-128; 160; 164-165; 180.

FOLMER-JOHNSON, T.N.O., “**Elementos de Magnetismo**”. São Paulo: Livraria Nobel, 1968, p. 10-12; 129.

KOSHKIN, N.; SHIRKEVICH M. “**Handbook of Elementary Physics**”. Moscow: Mir Publishers, 1986, p. 140.

MCCAIG, M. “Demagnetization of Magnets Due Contact with Ferromagnetic Bodies”. **Journal of Scientific Instruments**, v. 3, p. 311-12, aug. 1956.

PARKER, R. J.; STUDDERS, R. “**Permanent Magnets and their Application**”. New York: John Wiley and Sons, 1962, p. 32; 89-90; 144; 294-295.

SILVEIRA, F. L. **Como se calcula a energia magnética em um imã**. Porto Alegre: Creff, 2014. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=como-se-calcula-a-energia-magnetica-em-um-ima>. Acesso em: 10 set. 2018.

STEINGROEVER, GmbH. “**Magnetisieren, Entmagnetisieren und Kalibrieren von Permanent-Magnetsystemen**”. Cologne: Dr. Steingroever GmbH, 1992, p. 12.

ZUBOV, V.; SHALNOV, V. **Problems in Physics**. Moscow: MIR Publishers, 1974, p. 262.